

فصل چهارم

جریان عبوری از لوله‌ها

۴-۱ مقدمه

یکی از راههای انتقال و توزیع آب شرب در شهرها سیستم لوله‌های باشد. معمولاً آب از محل سدها یا چاه‌ها با لوله‌هایی که قطر آنها تأمین‌کننده نیاز محل مصرف است، به مخازن تصفیه و سپس به منازل منتقل می‌گردد. مساله اصلی مربوط به لوله‌ها، افت انرژی ناشی از حرکت سیال است. حرکت آب در لوله‌ها از محلی که انرژی بیشتری دارد به سمت محلی که انرژی کمتری است بر طبق معادله انرژی یا برنولی صورت می‌گیرد.

در فصول گذشته معادلات اصلی مربوط به تحلیل جریان سیال را تشریح کردیم. در اغلب موارد فرض کردیم که سیال بی اصطکاک و تلفات صفر باشد، بی‌آنکه در مورد علل ایجاد آنها تفحص کنیم. در این فصل به بررسی جریان سیال واقعی می‌پردازیم، یعنی وضعیتهایی را مطالعه می‌کنیم که در آنها تلفات اهمیت دارد. یکی از علل پدید آمدن تلفات، لزجت سیال است که باعث می‌شود در جریان تنش‌های برشی به وجود آیند.

برای درک مفهوم لزجت، سه بطری هم اندازه را در نظر بگیرید. اولین بطری را با یک مایع سبک مثل الکل، دومین بطری را با آب و سومین بطری را با روغن به یک میزان پر کنید. اگر هر سه بطری را به یک مقدار کج کنید، متوجه خواهید شد که بطری حاوی الکل ابتدا خالی می‌شود و سپس به ترتیب بطری‌های آب و روغن خالی خواهند شد. با تحلیل این مسئله درمی‌یابیم که هر مایع دارای خاصیتی به نام لزجت است که

دبی جریان مایع را کنترل می‌کند.

۲-۴ انواع جریان در لوله‌ها

جریان سیالات در لوله‌ها به دو گونه ۱. آرام (لایه‌ای) ۲. آشفته (درهم) صورت می‌گیرد که در این بخش به بررسی آنها می‌پردازیم.

۱-۲-۴ جریان آرام^۱ (ورقه‌ای)

هنگامی که حرکت سیال به صورت لایه‌های موازی با یکدیگر صورت گیرد، جریان از نوع آرام است که مربوط به مایعات بسیارلزج مثل حرکت روغن یا گلیسرین در لوله یا مایعات با سرعت کم می‌باشد. این نوع جریان به ندرت در طبیعت یافت می‌شود. برای مثال حرکت آب در لایه‌های زیرزمین که سرعت آن در حدود چند متر در سال است نمونه‌هایی از جریان آرام هستند.

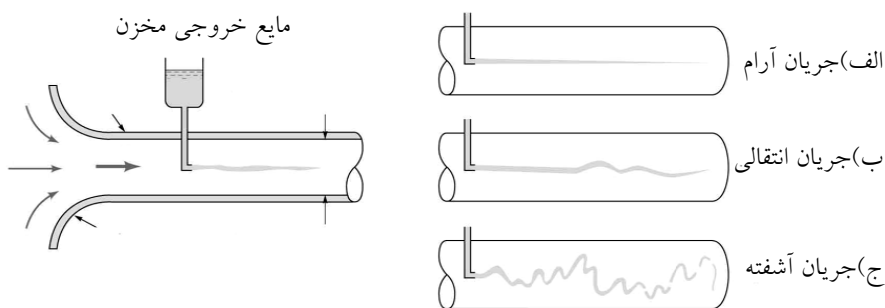
۲-۲-۴ جریان آشفته^۲ (متلاطم یا درهم)

جریان آشفته جریانی است که در آن بی ثباتی و ناپایداری به طور مداوم وجود دارد، همچنین در جریان آشفته قسمت‌های مختلف سیال با هم مخلوط شده و فشار و سرعت جریان در هر نقطه نسبت به زمان متغیر است. در حالت جریان متلاطم، فقط امتداد تقریبی خطوط جریان از شکل بستر تبعیت می‌نماید و در حالت کلی حرکت ذرات سیال نامنظم بوده و مسیر آنها به صورت منحنی‌های نامشخص می‌باشد. در این حالت تبادل مومتم شدیدی بین ذرات وجود خواهد داشت. برای مثال حرکت آب در لوله‌ها با سرعت زیاد و جریان در رودخانه‌ها کوهستانی نمونه‌هایی از جریان آشفته هستند.

۳-۴ معیار آرام یا آشفته بودن جریان با استفاده از عدد رینولدز

مخزن شکل (۱-۴) را در نظر بگیرید که مایع درون مخزن توسط لوله‌ای از انتهای مخزن در حال تخلیه است. در ابتدای آزمایش، لوله توسط شیری بسته شده است. درون لوله،

ظرف کوچکی حاوی یک ماده رنگی است که در صورت جاری شدن مایع درون لوله، ماده رنگی نیز حرکت خواهد کرد. اگر شیر را به مقدار کمی باز کنیم، مایع درون لوله با سرعت کم درون لوله حرکت خواهد کرد. ماده رنگی نیز به واسطه حرکت مایع درون لوله حرکت می‌کند. در سرعت‌های پایین مایع، ماده رنگی به صورت یک لایه نازک درون لوله حرکت می‌کند. با افزایش سرعت مایع (باز شدن بیشتر لوله) هنوز ماده رنگی به صورت لایه درون لوله جاری است تا اینکه به حالت حدی می‌رسیم که در آن ماده رنگی از حالت لایه آرام و صاف خارج شده و شروع به نوسان می‌کند.



شکل ۱-۴

حالتی که ماده رنگی به صورت لایه‌ای درون لوله حرکت می‌کند را جریان آرام و حالتی که مایع از حالت لایه‌ای خارج می‌شود را جریان انتقالی (گذرا یا بینابین) گویند. با افزایش سرعت مایع، نوسان ماده رنگی بیشتر شده ولی هنوز پیوستگی خود را حفظ کرده و در لوله پخش نشده است و جریان هنوز انتقالی است. با افزایش بیشتر سرعت مایع به حالت حد دوم می‌رسیم که در آن ماده رنگی درون لوله پخش شده و هیچ تمایز بین ماده رنگی و مایع اولیه وجود ندارد. به این حالت، جریان آشسته یا مغشوش گویند. (شکل ج ۱-۴)

برای اینکه این آزمایش را برای مقاطع مختلف تکرار نکنیم و برای سهولت کار عدد بدون بعدی به نام عدد رینولدز تعریف می‌شود که معیاری برای تعیین نوع جریان می‌باشد.

شرایطی که سبب بروز هر کدام از جریان‌های آرام و آشسته می‌شود در سال

۱۸۸۳ توسط شخصی به نام آزیون رینولدز^۱ بررسی گردید. وی دریافت که سه عامل در نوع حرکت نقش دارند:

۱. سرعت سیال: هر چه سرعت بالاتر باشد تمایل به آشفتگی بیشتر است.
 ۲. لزجت (ویسکوزیته یا گرانروی) سیال: هر چه لزجت کمتر باشد تمایل به آشفتگی بیشتر است.
 ۳. قطر لوله: هر چه قطر لوله بیشتر باشد تمایل به آشفتگی بیشتر است.
- لذا رینولدز نتایج فوق را در یک عدد که شاخص نوع حرکت باشد خلاصه نمود. این عدد یک کمیت بدون بعد است و بنام عدد رینولدز معروف شده است و به صورت زیر بیان می گردد:

$$Re = \frac{\text{نیروی اینرسی}}{\text{نیروی لزجت}} = \frac{VD}{\nu} = \frac{\rho VD}{\mu} \quad (۱-۴)$$

که در آن: Re : عدد رینولدز؛ V : سرعت متوسط جریان در لوله؛ D : قطر لوله؛ ν : لزجت سینماتیکی، ρ : چگالی سیال و μ : لزجت دینامیکی سیال است.

عدد رینولدز نسبت نیروی اینرسی به نیروی لزجی است. حال اگر این نسبت کوچک باشد، به این معنی است که نیروی لزجی قابل ملاحظه است و می تواند از آشفتگی جریان جلوگیری کند. در این حالت جریان سیال آرام خواهد بود. ولی اگر عدد رینولدز بزرگ باشد، نیروی لزجی در برابر اینرسی قابل صرف نظر کردن است. در این حالت اینرسی سبب ایجاد شتاب در سیال و آشفتگی جریان می شود.

اگر عدد رینولدز کمتر از ۲۳۰۰ (در برخی کتب کمتر از ۲۱۰۰ یا ۲۰۰۰) باشد جریان به صورت آرام است و اگر عدد رینولدز بیشتر از ۴۰۰۰ باشد، جریان به صورت آشفته می باشد. چنانچه عدد رینولدز بین ۲۳۰۰ تا ۴۰۰۰ باشد، جریان به صورت گذرا یا بینابین یا انتقالی خواهد بود که پس از این، جریان از حالت آرام به حالت متلاطم تبدیل می شود.

عدد رینولدز	نوع جریان
$Re < 2300$	مطمئناً جریان آرام یا لایه ای یا ورقه ای
$2300 < Re < 4000$	احتمال دارد آرام و یا آشفته باشد (بینابین)
$Re > 4000$	جریان سیال آشفته خواهد بود.

عدد رینولدز ۲۳۰۰ را عدد رینولدز بحرانی می‌گویند و تبدیل جریان آرام به متلاطم در هر لوله هنگامی رخ می‌دهد که عدد رینولدز از عدد رینولدز بحرانی ($Re > 2300$) تجاوز نماید.

مثال ۴-۱: آب در درجه حرارت $50^\circ F$ در یک لوله به قطر $D = 0.73 \text{ in}$ جریان دارد، مطلوب است محاسبه:

الف) حداقل زمان لازم برای پر کردن یک ظرف به حجم 0.125 ft^3 با آب، اگر جریان در لوله آرام باشد.

ب) حداکثر زمانی که برای پر کردن همان ظرف با آب طول می‌کشد، اگر جریان در لوله آشفته باشد.

حل: برای درجه حرارت $50^\circ F$ مقدار لزجت دینامیکی برابر $(\mu = 2/73 \times 10^{-5} \text{ lb.s/ft}^2)$

همچنین می‌دانیم $\rho = 1/94 \text{ slug/ft}^3$ است.

الف) برای جریان آرام، حداقل زمان لازم برای پر کردن ظرف هنگامی است که عدد رینولدز، حداکثر مقدار مجاز برای جریان آرام را داشته باشد. در این مثال حداکثر مقدار مجاز را $Re = 2300$ فرض می‌کنیم بنابراین:

$$Re = \frac{\rho V D}{\mu} = 2300 \Rightarrow V = \frac{2300 \mu}{\rho D} = \frac{2300 \times 2/73 \times 10^{-5}}{1/94 \times \frac{0.73}{12}} \Rightarrow V = 0.532 \text{ ft/s}$$

$$Q = \frac{V}{t} \Rightarrow t = \frac{V}{Q} = \frac{V}{AV} = \frac{0.125}{\frac{\pi}{4} \left(\frac{0.73}{12} \right)^2 \times 0.532} = 8.08 \text{ ثانیه}$$

ب) اگر جریان در لوله آشفته باشد، حداکثر زمان برای پر کردن ظرف هنگامی است که عدد رینولدز، حداقل مقدار مجاز برای جریان آشفته را داشته باشد یعنی: $Re = 4000$ ، بنابراین:

$$\frac{\rho V D}{\mu} = 4000 \Rightarrow V = \frac{4000 \times 2/73 \times 10^{-5}}{1/94 \times \frac{0.73}{12}} = 0.925 \text{ ft/s}$$

$$Q = \frac{V}{t} \Rightarrow t = \frac{V}{Q} = \frac{0.125}{\frac{\pi}{4} \left(\frac{0.73}{12} \right)^2 \times 0.925} \Rightarrow t = 4.65 \text{ ثانیه}$$

علت وجود دبی جریان (Q) بیشتر در جریان آشفته نسبت به جریان آرام، مقاومت کمتر در مقابل جریان آشفته است.

مثال ۴-۲: سرعت بحرانی (V_C) نفت هنگامی که در یک لوله به قطر 0.15 m

جریان دارد، چقدر است؟ $\left(v = 8 \times 10^{-5} \text{ m/s}\right)$

حل: می‌دانیم عدد رینولدز بحرانی (تبدیل جریان آرام به جریان گذرا) (بینابین)

برابر $Re = 2300$ است، بنابراین:

$$Re = \frac{V_C D}{v} \Rightarrow V_C = \frac{2300 \cdot v}{D} = \frac{2300 \times 8 \times 10^{-5}}{0.15} = 1.22 \text{ m/s}$$

اگر به جای $Re = 2300$ از $Re = 2100$ استفاده کنیم، $V_C = 1.12 \text{ m/s}$ خواهد

شد.

مثال ۴-۳: قطر یک لوله را طوری تعیین کنید که در آن مایعی با لزجت

سینماتیکی $v = 6/55 \times 10^{-5} \text{ m/s}$ با دبی $0.201 \text{ m}^3/\text{s}$ به صورت جریان آرام در حرکت

باشد.

حل:

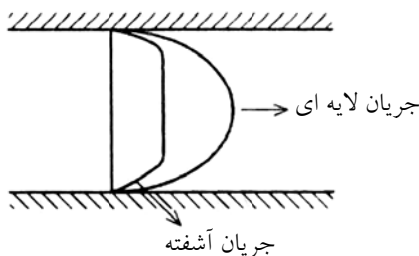
$$Q = AV \Rightarrow 0.201 = \frac{\pi D^2}{4} \times V \Rightarrow V = \frac{0.804}{\pi D^2}$$

همچنین برای جریان آرام در لوله داریم:

$$Re = \frac{VD}{v} \Rightarrow 2300 = \frac{0.804 D}{D^2 \times 6/55 \times 10^{-5}} \Rightarrow D = 1/69 \text{ ft}$$

۴-۴ نیمرخ توزیع سرعت‌ها

از جمله تفاوت‌های دیگر جریان آشفته و آرام این است که منحنی توزیع سرعت‌ها نیز در این دو حالت متفاوت است. البته منحنی توزیع سرعت‌ها در مورد جریان آشفته را باید برای یک لحظه زمانی خاص بررسی کرد زیرا در لحظات مختلف، این منحنی‌ها متفاوت‌اند. بدیهی است برای مقایسه دو منحنی در یک لوله، باید دو سیال مختلف را انتخاب کرد که سرعت واحدی، در مورد یکی جریان آرام و در مورد دیگری جریان آشفته را به وجود آورد.



شکل ۴-۲ مقایسه نیمرخ توزیع سرعت‌ها در جریان آرام و آشفته [۳]

مقایسه منحنی توزیع سرعت‌ها در مورد یک لوله معین و با یک شدت جریان ثابت در دو حالت جریان آرام و آشفته، تفاوت‌های بارزی را آشکار می‌سازد (شکل ۴-۲). چنانچه از شکل دیده می‌شود، منحنی مزبور در مورد جریان آشفته، نسبت به منحنی نظیر جریان آرام، یکنواخت تر و شیب آن در جداره‌های لوله زیادتر است. بنابراین، ضریب α در رابطه برنولی، که بستگی به نحوه توزیع سرعت‌ها داشت، در جریان آشفته به مراتب کوچکتر از جریان آرام است.

۴-۵ جریان‌های داخلی و خارجی

جریان‌ها را بر اساس وسعت میدان جریان به دو دسته داخلی و خارجی تقسیم‌بندی می‌نمایند. جریان داخلی^۱ چنانچه از نام آن بر می‌آید، به جریان سیال در داخل یک ناحیه محصور اطلاق می‌شود. مانند جریان در لوله یا شیبوره. جریان خارجی^۲ به جریان سیال در یک ناحیه نامحصور اطلاق می‌شود و در آن توجه ما معطوف است به الگوی جریان در پیرامون جسمی که در معرض جریان قرار دارد. مانند جریان در اطراف ایرفول یا قایق یازیر دریایی.

۴-۶ لایه مرزی

حرکت سیال واقعی به شدت متأثر از حضور مرز جامد است. ذراتی از سیال که با مرز تماس دارند، ساکن می‌مانند. در مجاورت مرز ناحیه‌ای به وجود می‌آید که در آن گرادیان سرعت بزرگ است و تنش‌های برشی اهمیت دارند. این ناحیه، لایه مرزی

نامیده می‌شود. در روی یک مرز یک تنش برشی به سیال وارد می‌شود که سرعت آن را کاهش می‌دهد.

۷-۴ جریان کاملاً توسعه یافته^۱

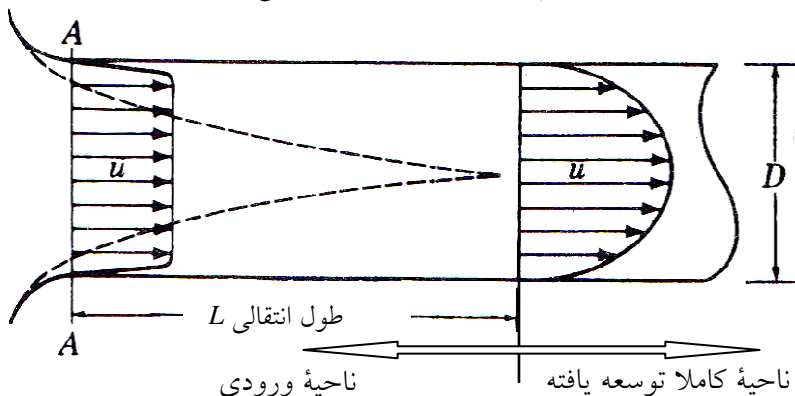
ناحیه ورودی ناحیه‌ای است از ورودی لوله شروع شده و تا نقطه‌ای که لایه‌های مرزی در مرکز لوله به هم می‌رسند ادامه می‌یابد. طول این ناحیه را طول ورودی می‌نامیم. در شکل (۳-۴) جریان در ناحیه ورودی یک لوله را در نظر می‌گیریم. در ورودی لوله سرعت یکنواخت است. با توجه به اصل عدم لغزش، سرعت در دیواره لوله در کل مسیر برابر صفر است. دیواره لوله یک نیروی برشی اعمال می‌کند که در نتیجه آن سرعت جریان در کنار سطح کاهش پیدا می‌کند. کاهش سرعت و کند شدن جریان از محور مرکزی تا خط مرزی لوله ادامه می‌یابد. ناحیه پس از ناحیه ورودی را ناحیه توسعه یافته می‌نامیم، در این ناحیه توزیع سرعت تثبیت می‌شود.

طول ناحیه ورودی (L) در جریان آرام و آشفته از روابط زیر به دست می‌آید:

$$\frac{L}{D} = 0.058 \text{ Re} \quad \text{جریان آرام} \quad (۲-۴)$$

$$10 \leq \frac{L}{D} \leq 60 \quad \text{جریان آشفته (درهم)} \quad (۳-۴)$$

L طول ورودی، D قطر لوله و Re عدد رینولدز می‌باشد.



شکل ۳-۴ ناحیه ورودی لوله

با توجه به رابطه جریان درهم، مشاهده می‌شود که طول ورودی تابع عدد رینولدز نیست و طول ناحیه ورودی در جریان درهم بسیار کوتاه‌تر از جریان آرام است.

مثال ۴-۴: سیال تراکم‌ناپذیری در لوله‌ای به قطر D و طول L جریان دارد. در حالتی که عدد رینولدز در لوله ۱۰۰ باشد، طول توسعه یافته نسبت به قطر لوله تقریباً چقدر است؟

$$\begin{aligned} \frac{L}{D} &\cong 6 \quad (1) \\ \frac{L}{D} &\cong 0.06 \quad (2) \\ \frac{L}{D} &\cong 0.06 \quad (3) \\ \frac{L}{D} &\cong 0.06 \quad (4) \end{aligned}$$

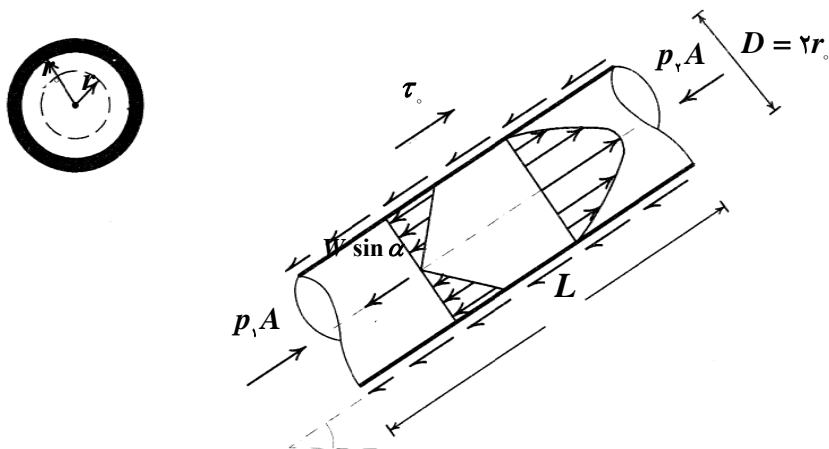
حل: برای جریان آرام داریم:

$$\frac{L}{D} = 0.06 \text{ Re} = 0.06 \times 100 = 6$$

گزینه ۱ صحیح است.

۸-۴ تنش برشی در لوله‌ها

برای محاسبه تنش برشی در لوله مدور را وقتی جریان دائمی، تراکم‌ناپذیر و یکنواخت است بدین صورت عمل می‌نماییم. مطابق شکل (۴-۴) قطعه‌ای از لوله به طول L را در نظر می‌گیریم و دیاگرام آزاد آن را رسم می‌کنیم:



شکل ۴-۴

با نوشتن معادله مومنتم و استفاده از روابط برنولی برای حجم کنترل در داخل لوله خواهیم داشت:

$$\tau_o = \frac{h_f \gamma D}{4L} = \frac{h_f \gamma r_o}{2L} \quad (4-4)$$

که در این رابطه:

τ_o : تنش برشی روی جداره لوله

h_f : میزان افت انرژی ناشی از اصطکاک در طول L از جریان

L : طولی از جریان که در آن افت h_f اتفاق افتاده است.

γ : وزن مخصوص سیال

r_o, D : به ترتیب قطر و شعاع لوله

نکته (۱): رابطه (۴-۴) برای هر دو نوع رژیم جریان یعنی جریان آشفته و آرام صادق است.

نکته (۲): اگر فاصله یک نقطه دلخواه سیال از محور هندسی لوله را با r نشان دهیم، ثابت می شود که تنش برشی در آن نقطه برابر است با:

$$\tau = \frac{h_f \gamma r}{2L} = \tau_o \left(\frac{r}{r_o} \right) \quad (5-4)$$

بنابراین می توان گفت، تنش برشی در لوله دارای رابطه خطی با شعاع است و مقادیر حداکثر و حداقل آن به ترتیب در جداره ها ($r = r_o, \tau_{\max} = \tau_o$) و در محور هندسی لوله ($r = 0, \tau_{\min} = 0$) می باشد.

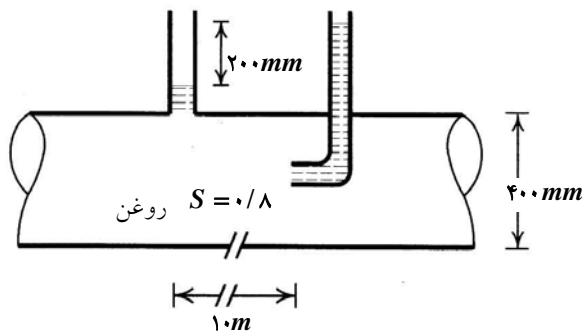
نکته (۳): اگر لوله مدور بصورت افقی باشد، در آن صورت خواهیم داشت:

$$Z_1 = Z_2 \rightarrow h_f \gamma = \Delta p \rightarrow \tau_o = \frac{\Delta p D}{4L} = \frac{\Delta p}{L} \left(\frac{D}{4} \right) \quad (6-4)$$

مثال ۴-۵: اگر دبی عبوری از لوله نشان داده شده در شکل $120 \frac{\text{lit}}{\text{s}}$ باشد، تنش

برشی وارد بر جدار لوله چقدر است؟

$$\left(\pi \approx 3, g = 10 \frac{\text{m}}{\text{s}^2} \right)$$



شکل ۴-۵

روی محور لوله نقاط (۱) و (۲) را به ترتیب زیر پیزومتر و در دهانه ورودی لوله پیتو در نظر می‌گیریم. با نوشتن معادله برنولی بین این دو نقطه خواهیم داشت:

$$\frac{P_1}{\gamma} + \frac{V_1^2}{2g} = \frac{P_2}{\gamma} + \frac{V_2^2}{2g} + h_f \rightarrow h_f = \frac{\Delta P}{\gamma} + \frac{V_1^2}{2g}$$

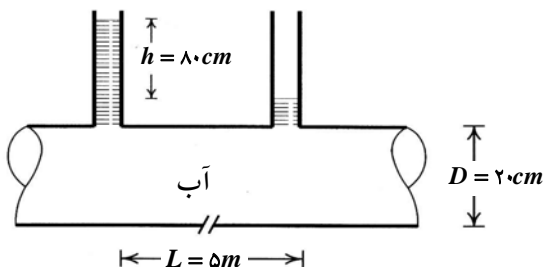
$$\left\{ \begin{aligned} V_1 &= \frac{Q}{A} = \frac{12 \times 10^{-3}}{\left(\frac{\pi \times 0.04^2}{4} \right)} = 1 \frac{m}{s} \\ \frac{\Delta P}{\gamma} &= 200 \text{ mm} = 0.2 \text{ m} \end{aligned} \right. \rightarrow h_f = 0.2 + \frac{1^2}{2 \times 10} = 0.25 \text{ m}$$

مقدار تنش برشی در جدار لوله برابر است با:

$$\tau_o = \frac{h_f \gamma D}{4L} = \frac{0.25 \times 10 \times 0.8 \times 0.04}{4 \times 10} = 0.02 \text{ KPa} = 20 \text{ Pa}$$

مثال ۴-۶: در شکل زیر مقدار تنش برشی وارده بر جدار لوله چقدر است؟ اگر

تنش دو برابر شود افت فشار در واحد طول چند برابر می‌شود؟



شکل ۴-۶

$$\tau_0 = \frac{\Delta PD}{4L} = \frac{0.1 \times 9 / 80.6 \times 0.2}{4 \times 5} = 0.1 \text{ } \gamma \text{ } KPa = 78 Pa$$

۹-۴ جریان آرام در لوله با سطح مقطع مدور

توزیع تنش برشی در لوله‌های مدور به صورت خطی و توزیع سرعت در لوله مدور به صورت سهمیگون است. همچنین مقدار سرعت متوسط و دبی جریان و افت انرژی ناشی از اصطکاک (رابطه هاگن - پوازی) به صورت زیر بیان می‌شود:

سرعت متوسط:

$$V = \frac{u_{\max}}{2} \rightarrow V = \frac{\gamma h_f D^2}{32 \mu L} \quad (7-4)$$

دبی جریان در لوله‌های آرام:

$$Q = V.A = \left(\frac{h_f \gamma D^2}{32 \mu L} \right) \left(\frac{\pi D^2}{4} \right) \rightarrow Q = \frac{\pi h_f \gamma D^4}{128 \mu L} \quad (8-4)$$

بنابراین برای یک لوله افقی، دبی جریان آرام:

(الف) به طور مستقیم متناسب با افت فشار است.

(ب) به طور معکوس متناسب با لزجت و طول لوله است.

(ج) به طور مستقیم متناسب با توان چهارم قطر لوله است. بنابراین با ثابت بودن تمام پارامترها، اگر قطر لوله دو برابر شود، مقدار دبی جریان ۱۶ برابر خواهد شد. اگر لوله غیر افقی باشد، دبی جریان آرام از رابطه زیر محاسبه می‌شود:

$$Q = \frac{\pi (\Delta P - \gamma L \sin \theta) D^4}{128 \mu L} \quad (9-4)$$

که در آن θ زاویه بین لوله و سطح افق است. برای جریان در لوله بطرف بالا $\theta > 0$ و برای جریان بطرف پایین در لوله $\theta < 0$ است.

افت انرژی ناشی از اصطکاک (رابطه هاگن - پوازی)

$$V = \frac{h_f \gamma D^2}{32 \mu L} \rightarrow h_f = \frac{32 \mu V L}{\gamma D^2} \quad (10-4)$$

مثال ۷-۴: در یک لوله افقی به قطر ۲cm روغن با لزجت 0/18 Pa. s و جرم

مخصوص جریان دارد. افت فشار در واحد طول لوله $\frac{kPa}{m}$ ۱۲۰ است. دبی جریان را

به دست آورید؟

$$Q = \frac{\pi \Delta P D^4}{128 \mu L} = \frac{\pi D^4}{128 \mu} \left(\frac{\Delta P}{L} \right) = \frac{\pi \times 0.02^4}{128 \times 0.018} \times (120 \times 10^3) = 2/62 \times 10^{-3} \frac{m^3}{s} = 2/62 \frac{Lit}{s}$$

حال صحت فرض اولیه را بررسی می‌کنیم:

$$V = \frac{Q}{A} = \frac{2/62 \times 10^{-3}}{\left(\frac{\pi \times 0.02^2}{4} \right)} = 8/34 \frac{m}{s}$$

$$Re = \frac{\rho V D}{\mu} = \frac{1450 \times 8/34 \times 0.02}{0.018} = 1344$$

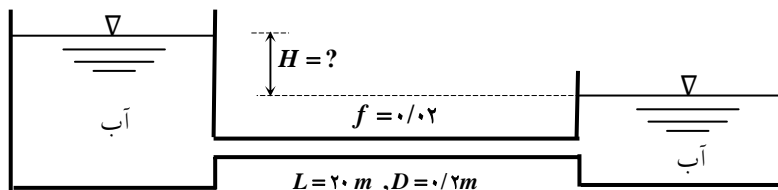
همان‌طور که ملاحظه می‌شود عدد رینولدز کوچکتر از ۲۳۰۰ است، یعنی فرض اولیه ما مبتنی بر آرام بودن جریان صحیح بوده است.

مثال ۴-۸: در شکل زیر، $\frac{f}{D} \cdot \frac{V^2}{2g}$ برابر ۰/۰۷۵ است. اگر افت‌های موضعی صرف‌نظر شود، مطلوب است تعیین:

الف) مقدار ارتفاع H ؟

ب) تنش برشی روی جدار لوله؟

ج) دبی جریان عبوری از لوله؟



شکل ۴-۷

$$h_f = f \frac{L}{D} \cdot \frac{V^2}{2g} \rightarrow \frac{h_f}{L} = \frac{f}{D} \cdot \frac{V^2}{2g} = 0.075$$

$$h_f = 0.075 \times 20 = 1.5 m$$

الف) با نوشتن معادله برنولی بین دو نقطه‌ای که در بالادست و پایین دست جریان، روی سطح آزاد آب قرار گرفته‌اند، نتیجه می‌شود که:

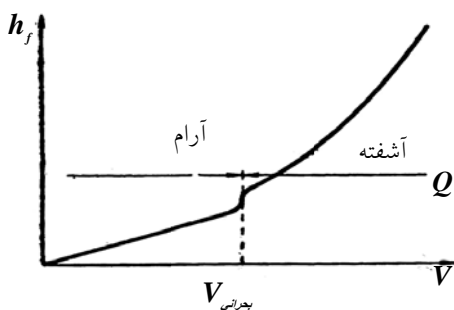
$$H = h_f = 1/5m \quad (\text{ب})$$

$$\tau_o = \frac{h_f \gamma D}{4L} = \frac{0.02 \times 2 \times Q}{4 \times 20} \rightarrow Q = 0.12 \frac{m^3}{s} = 120 \frac{lit}{s} \quad (\text{ج})$$

۴-۱۰ محاسبه افت

افت انرژی و یا به عبارت دیگر ارتفاع نظیر افت انرژی، به عواملی نظیر شکل، اندازه و ناهمواری مسیر جریان، سرعت و لزجت سیال بستگی دارد و مستقل از فشار مطلق سیال است. میزان افت انرژی در دبی برابر در لوله، در مورد جریان آشفته و آرام متفاوت و در حالت آشفته، به مراتب زیادتر از حالت آرام است. افزایش افت، ناشی از تولید موج و اختلاط منحنی‌های مسیرذرات است. مورد جریان آرام، میزان افت با توان اول سرعت (یا شدت جریان) متناسب است، در صورتی که در تبدیل جریان به حالت آشفته، میزان افت به‌طور ناگهانی بالا می‌رود و در این حالت، منحنی تغییرات آن نسبت به سرعت، به‌صورت یک سهمی درمی‌آید (شکل ۴-۸)

از آنجا که مطالعه جریان آشفته فوق‌العاده پیچیده و محاسبه تحلیلی آن مشکل است، لذا مطالعات این حالت، بیشتر بر اساس کارهای تجربی و بررسی قوانین مختلف حرکت، با استفاده از مدل‌های هیدرولیکی انجام می‌گیرد و در این مورد، فرمول‌های متعددی وجود دارد که باید آنها را در مورد لوله‌های صاف و زبر به‌طور جداگانه مورد بررسی قرار داد.



شکل ۴-۸ تغییرات افت نسبت به سرعت یا شدت جریان در حالات مختلف

افت انرژی بین دو نقطه از جریان یک سیال حقیقی را می‌توان طبق رابطه برنولی، به‌صورت زیر به‌دست آورد:

$$Z_1 + \frac{V_1^2}{2g} + \frac{p_1}{\gamma} = Z_2 + \frac{V_2^2}{2g} + \frac{p_2}{\gamma} + \sum h \quad (۱۱-۴)$$

بنابراین می‌توان گفت، در حالت کلی افت انرژی، مجموع دو افت (اصطکاک) طولی و موضعی خواهد بود.

$$\sum h = h_f + h_L \quad (۱۲-۴)$$

اگر اتلاف انرژی در اثر وجود اصطکاک باشد، به آن افت انرژی اصطکاک یا h_f می‌گویند ولی چنانچه تغییر ناگهانی مقطع یا تغییر امتداد مسیر جریان سبب اتلاف انرژی شود، در آن صورت افت انرژی موضعی (h_L) خواهیم داشت.

علت افت انرژی در رابطه فوق را باید در عوامل زیر جستجو کرد:

۱. وجود اصطکاک بین ذرات سیال در اثر وجود لزجت یا بین ذرات سیال و جدار لوله یا کانال هدایت سیال

۲. وجود جریان‌های گردابی در مسیر جریان به دلیل تغییر سریع مقطع و یا تغییر امتداد مسیر جریان که منجر به ایجاد حرکت‌های نامنظم در سیال می‌شود.

اگر افت فشار ایجاد شده در لوله‌ای به طول L و قطر D را با ΔP نمایش دهیم و سرعت سیال درون لوله برابر V باشد، برای تعیین افت ناشی از اصطکاک از معادله زیر که به معادله دارسی - ویسباخ است استفاده می‌کنیم:

$$h_f = \frac{\Delta P}{\gamma} = f \frac{L V^2}{D 2g} \quad (۱۳-۴)$$

که در آن h_f افت ارتفاع یا افت خط تراز هیدرولیکی؛ f ضریب اصطکاک؛ L طول لوله؛ D قطر داخلی لوله و V سرعت متوسط در آن است. بُعد h_f طول است و بر حسب نیوتن - متر بر نیوتن بیان می‌شود.

رابطه فوق به نام رابطه دارسی - ویسباخ معروف می‌باشد و برای جریان‌های آرام و آشسته صادق است. h_f هد تلفات اصطکاک بوده و از تقسیم افت فشار ایجاد شده بر حسب ΔP بر γ به دست می‌آید. f در حالت کلی تابع عدد رینولدز و زبری ε می‌باشد و به نام ضریب اصطکاک *Moody* معروف است. در مورد لوله‌های صاف، افت ناشی از اصطکاک را می‌توان تماماً به کمک عدد رینولدز محاسبه کرد ولی در لوله‌های زبر، ضریب اصطکاک f علاوه بر عدد رینولدز، به زبری سطح داخلی لوله نیز بستگی دارد. یکی از مشکلات در این زمینه محاسبه زبری مطلق ε است. به این

دلیل در عمل از زبری نسبی $\frac{\varepsilon}{d}$ برای محاسبه ضریب اصطکاک f در لوله‌ها استفاده می‌شود. در واقع علت تعریف زبری نسبی این است که زبری مطلق امکان دارد در مورد لوله‌های بزرگ چندان اهمیتی نداشته باشد در صورتیکه همین زبری، در لوله‌های کوچک می‌تواند افت قابل توجهی را ایجاد کند. علاوه بر زبری نسبی، شکل و نحوه توزیع ناهمواری‌ها نیز در مقاومت و در نتیجه در میزان افت تاثیر دارد. ساده‌ترین حالت آن است که ناهمواری سطح یکنواخت و متجانس باشد که در این حالت لوله با زبری یکنواخت خوانده می‌شود. مقدار ε برای مواد مختلف از جدول (۷-۳) به‌دست می‌آید.

جدول ۷-۳: نمونه مقادیر زبری دیواره برای مجراهای تجاری

مضالح (نو)		زبری (ε)
		m
		ft
فولاد پرچی		۰/۰۰۳ - ۰/۰۰۹
بتن		۰/۰۰۱ - ۰/۰۰۳
چوب		۰/۰۰۰۶ - ۰/۰۰۰۹
چدن		۰/۰۰۰۲۶
آهن گالوانیزه		۰/۰۰۰۸۵
چدن قیراندود		۰/۰۰۰۵
فولاد تجاری یا فولاد نرم		۰/۰۰۰۴
لوله برنجی یا لوله مسی		۰/۰۰۰۱۵
شیشه و پلاستیک		۰/۰۰۰۰۵
«صاف»		«صاف»

از: Lewis F. Moody (ضریب اصطکاک برای لوله جریان)

با توجه به این که تعیین ضریب اصطکاک f از دیاگرام مودی به‌ویژه در مسائلی که حل آنها مستلزم کاربرد روشهای آزمون و خطاست، نسبتاً وقت گیر است. بدین لحاظ در کارهای صنعتی برای محاسبات تلفات اصطکاکی معمولاً از فرمول‌های تجربی استفاده می‌کنند.

۴-۱۱: طریقه محاسبه f (ضریب اصطکاک داری ویسباخ)

برای به‌دست آوردن f روش‌ها و معادلات تجربی زیادی به‌دست آمده است. نمودار مودی (شکل) امکان محاسبه ضریب اصطکاک را به کمک عدد رینولدز (Re) و زبری

نسبی $\frac{\varepsilon}{D}$ فراهم می‌کند.

این نمودار به کمک کلبروک با استفاده از داده‌های تجربی نیکورادزه واز طریق رگرسیون آماری برای لوله‌های تجاری با دامنه نسبی $(\frac{\varepsilon}{D} < 0.00098)$ به دست آمده است.

ضریب اصطکاک در حالت کلی تابع عدد رینولدز و زبری نسبی است:

$$f = \phi(\text{Re}, \frac{\varepsilon}{d}) \quad (14-4)$$

همان‌طوری که در شکل (۴-۹) مشاهده می‌کنید دیاگرام مودی با توجه به رژیم جریان شامل سه ناحیه می‌باشد.

۱. ناحیه جریان آرام: این ناحیه در سمت چپ دیاگرام مودی قرار دارد و شامل اعداد کوچکتر ۲۳۰۰ می‌باشد. در این ناحیه ضریب اصطکاک تنها تابع عدد رینولدز است واز رابطه زیر به دست می‌آید:

$$f = \frac{64}{\text{Re}} \quad (15-4)$$

۲. ناحیه جریان بینابین: این ناحیه که به آن ناحیه بحرانی نیز می‌گویند پس از ناحیه جریان آرام قرار دارد و مربوط به اعداد رینولدز بین ۲۳۰۰ و ۴۰۰۰ است. در این حالت جریان ناپایدار بوده و کوچک‌ترین اغتشاشی در آن سبب تبدیل جریان از حالت آرام به آشفته می‌گردد. ضریب اصطکاک در ناحیه جریان عبوری تابعی از عدد رینولدز و زبری نسبی لوله است ولی به علت ماهیت گذرای جریان در دیاگرام مودی قابل نمایش نمی‌باشد.

۳. ناحیه جریان آشفته: این ناحیه از عدد رینولدز ۴۰۰۰ به بعد شروع می‌شود.

در ناحیه جریان آشفته $f = \phi(\text{Re}, \frac{\varepsilon}{d})$ می‌باشد و ضریب مودی با تغییر Re و $\frac{\varepsilon}{D}$ تغییر می‌کند. تا این ناحیه با افزایش Re ، ضریب اصطکاک کاهش می‌یابد. در ناحیه کاملاً آشفته با رینولدزهای خیلی بالا ($\text{Re} > 10^4$) ضریب مودی تنها تابع $\frac{\varepsilon}{D}$ می‌باشد و عدد رینولدز هیچ تاثیری روی f ندارد.

در حالت کلی می‌توان گفت: با افزایش عدد رینولدز، f کاهش می‌یابد، مگر در Re خیلی بزرگ ($\text{Re} > 10^4$) که f تابعی از Re نیست. در ضمن در حالت کلی با

افزایش ε ، ضریب اصطکاک افزایش می‌یابد.

تغییرات f با عدد رینولدز در نمودار مودی

الف) تا موقعی که جریان آرام است با افزایش عدد رینولدز، ضریب اصطکاک کاهش می‌یابد.

ب) در ناحیه گذرا ضریب اصطکاک با سرعت افزایش می‌یابد.

ج) در ناحیه جریان آشفته با افزایش عدد رینولدز، ضریب اصطکاک در امتداد منحنی لوله صاف کاهش می‌یابد.

د) در اعداد رینولدز خیلی زیاد، جریان کاملاً زبر است و ضریب اصطکاک در یک مقدار ثابت، زبری نسبی به شکل خط راست درمی‌آید.

همچنین به غیر از نمودار مودی با استفاده از فرمول‌های تجربی می‌توان ضریب اصطکاک f را تعیین نمود. برای جریان در لوله‌های با جدار صاف و زبر فرمولهای تجربی زیادی بین Re و f به دست آمده که تعدادی از آنها به شرح زیر می‌باشد:

برای لوله‌های صاف:

فرمول بلازیوس:

$$f = 0.3164 Re^{-1/4} \quad 2300 < Re < 10^4 \quad (16-4)$$

فرمول کلبروک:

$$\frac{1}{\sqrt{f}} = 2.0 \log \frac{Re \sqrt{f}}{2.51} \quad (17-4)$$

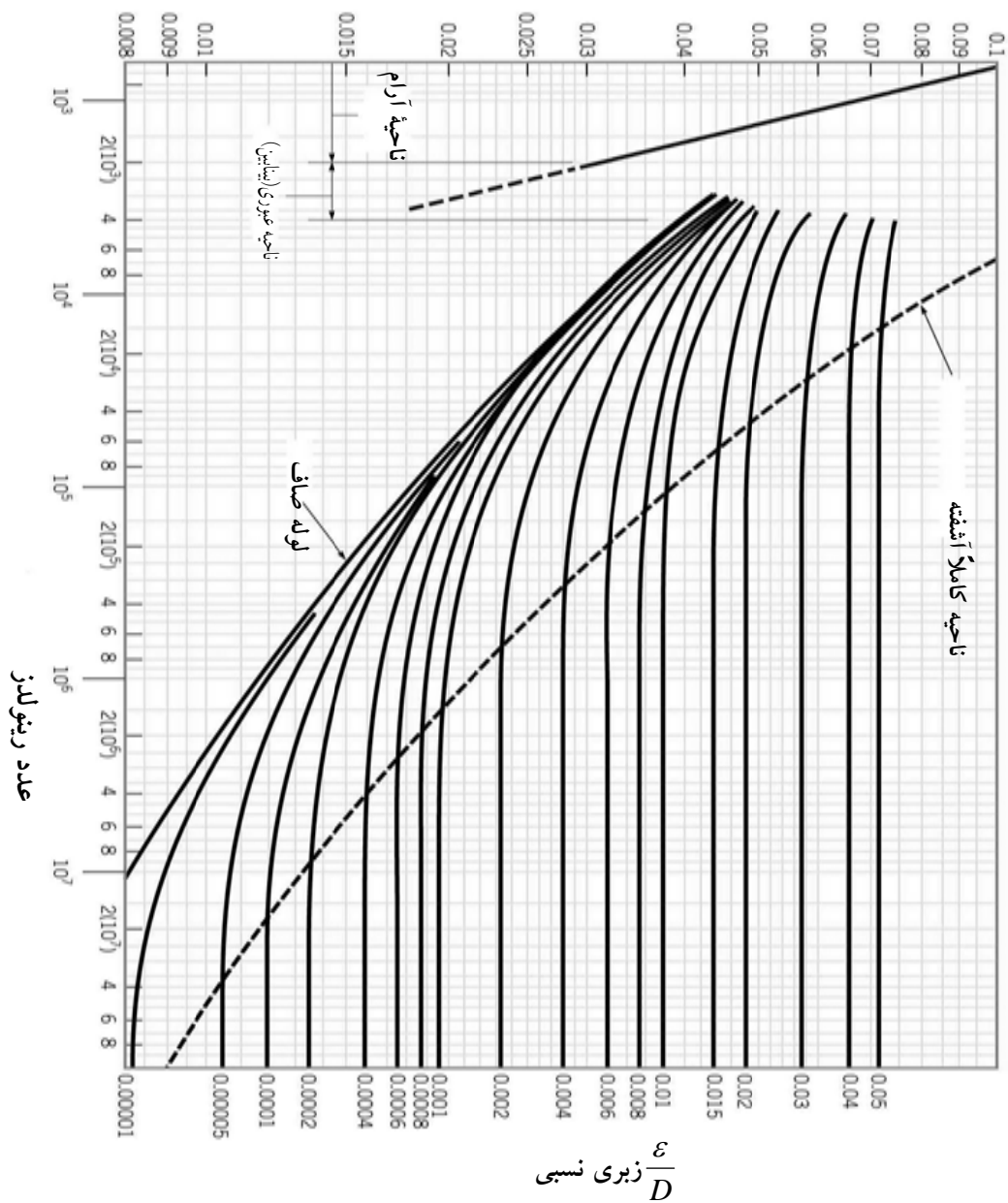
فرمول پراتل:

$$f = \left[2.0 \log \left(\frac{Re \sqrt{f}}{2.51} \right) - 0.4 \right]^{-2} \quad Re < 4 \times 10^4 \quad (18-4)$$

فرمول نیکورادزه:

$$f = 0.0032 + 0.221 Re^{-1/4} \quad 10^4 < Re < 10^5 \quad (19-4)$$

ضریب اصطکاک f



شکل ۴-۹ نمودار مودی

۲. برای لوله‌های زیر:

فرمول کلبروک:

$$\frac{1}{\sqrt{f}} = -2 \log \left(\frac{\varepsilon}{3.7 d} + \frac{2.51}{\text{Re} \sqrt{f}} \right) \quad (20-4)$$

فرمول پرانتل:

$$\frac{1}{\sqrt{f}} = 2 \log \left(\frac{\varepsilon}{d} \right) \quad (21-4)$$

برای ناحیه کاملاً زیر:

$$f = \frac{1}{\left[1.14 - 2 \log \left(\frac{\varepsilon}{D} \right) \right]^2} \quad (22-4)$$

۳. برای ناحیه انتقال:

فرمول کلبروک:

$$\frac{1}{\sqrt{f}} = 1.14 - 2 \log \left(\frac{\varepsilon}{D} + \frac{9.35}{\text{Re} \sqrt{f}} \right) \quad (23-4)$$

۳-۲- برای محدوده وسیعی از ناحیه انتقال و زیر:

$$f = \frac{0.25}{\log \left\{ \left[\left(\frac{\varepsilon}{3.7 d} \right) + \left(\frac{5.74}{\text{Re}^{1/4}} \right) \right] \right\}^2} \quad (24-4)$$

برای اجتناب از معادلات ضمنی فوق (یعنی اگر Re و $\frac{\varepsilon}{D}$ معلوم باشند، مقدار f

باید از طریق سعی و خطا محاسبه شود)، Haaland معادله صریح را ارائه کرده است:

$$\frac{1}{\sqrt{f}} = -1.8 \log \left(\frac{\varepsilon}{\text{Re}} + \frac{D}{3.7} \right)^{1/11} \quad (25-4)$$

نکات:

نکته: معادله داریسی - ویسباخ برای هر دو رژیم جریان آرام و درهم قابل

استفاده است.

نکته: معادله داریسی - ویسباخ را می‌توان برای هر مجرای (دایروی، غیر

دایروی و و کانال‌های روباز) به کار برد.

نکته: با استفاده از معادله دارسی - ویسباخ داریم:

$$f \text{ و } L = cte \Rightarrow h_f \propto \frac{Q^2}{d^5} \text{ یا } \frac{h_{f_2}}{h_{f_1}} = \left(\frac{Q_2}{Q_1}\right)^2 \left(\frac{d_1}{d_2}\right)^5 \quad (26-4)$$

$$f \text{ و } L \text{ و } h_f = cte \Rightarrow Q \propto d^{2/5} \text{ یا } \frac{Q_2}{Q_1} = \left(\frac{d_2}{d_1}\right)^{2/5} \quad (27-4)$$

نکته: رابطه بین h_f و سرعت به شکل زیر است:

$$h_f \propto V \quad \text{جریان آرام} \quad (28-4)$$

$$h_f \propto V^{1/5-2} \quad \text{جریان درهم} \quad (29-4)$$

نکته: در جریان کاملاً زیر h_f دقیقاً با توان دوم V تغییر می‌کند یعنی:

$$h_f \propto V^2$$

با افزایش سرعت، عدد رینولدز افزایش، f کاهش ولی h_f افزایش می‌یابد

زیرا با توجه به رابطه $h_f = \frac{L}{D} f \frac{V^2}{2g}$ افزایش V^2 خیلی بیشتر از کاهش f می‌باشد و لذا افزایش h_f خواهیم داشت.

نکته: دیاگرام مودی ضریب اصطکاک لوله‌های نو را مشخص می‌کند. برای

لوله‌های کار کرده ضریب اصطکاک، بیشتر از لوله‌های نو است.

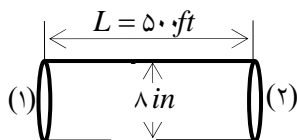
نکته: توزیع سرعت در جریان آشفته تخت است و می‌توان سرعت متوسط را

تقریباً برابر با سرعت ماکزیمم در نظر گرفت.

مثال ۹-۴: مطابق شکل از داخل یک لوله افقی به قطر ۸ اینچ و طول ۵۰۰ فوت؛ آب با

دبی در جریان است. اگر اختلاف فشار در دو سر لوله ۹/۸۰ فوت باشد، مطلوبست

محاسبه ضریب اصطکاک در این لوله؟



شکل ۱۰-۴

$$V = \frac{Q}{A} = \frac{6/31}{\frac{\pi}{4} \left(\frac{8}{12} \right)^2} \Rightarrow V = 18/1 \frac{ft}{s} \quad \text{می‌دانیم:}$$

رابطه انرژی را بین نقاط (۱) و (۲) می‌نویسیم:

$$z_1 + \frac{P_1}{\gamma} + \frac{V_1^2}{2g} = z_2 + \frac{P_2}{\gamma} + \frac{V_2^2}{2g} + f \frac{L}{D} \frac{V^2}{2g}$$

محور لوله را به عنوان سطح مبنا انتخاب می‌کنیم. چون لوله افقی است، پس $z_1 = z_2$ همچنین چون سطح مقطع لوله ثابت است ($D_1 = D_2$) در نتیجه رابطه پیوستگی $V_1 = V_2$ خواهد بود. بنابراین رابطه (۱) به صورت زیر نوشته می‌شود:

$$\left. \begin{aligned} \frac{P_1}{\gamma} = \frac{P_2}{\gamma} + f \frac{L}{D} \frac{V^2}{2g} \\ \frac{P_1 - P_2}{\gamma} = \frac{\Delta P}{\gamma} = 80/9 \end{aligned} \right\} \Rightarrow 80/9 = f \frac{50 \times \frac{18/1}{2 \times 32/2}}{\frac{8}{12}} \Rightarrow f = 0.212$$

۱۲-۴ معادلات تجربی برای تعیین دبی جریان

برای جریان آب در مجاری بسته و باز و در دماهای معمولی می‌توان از فرمولهای مانینگ و هیزن - ویلیامز استفاده کرد زیرا اثر لزجت در نظر گرفته نشده است و این دو فرمول فقط برای اعداد رینولدز بالا قابل استفاده می‌باشند.

۱-۱۲-۴ فرمول هیزن - ویلیامز

اگر چه معادلات دارسی - ویسباخ یکی از اساس ترین روشها برای تعیین افت بار و افت فشار در مجراهای بسته می‌باشد، معادلات تجربی نیز غالباً مورد استفاده واقع می‌شوند. یکی از معادلات که استفاده زیادی دارد معادله هیزن - ویلیامز می‌باشد.

$$\left. \begin{aligned} \text{SI) } V = 0.8492 \text{ } CAR^{1/63} S^{0.54} \quad (\text{سیستم}) \\ V = 1.318 \text{ } CAR^{0.63} S^{0.54} \quad (\text{سیستم انگلیسی}) \end{aligned} \right\} \Rightarrow Q = VA \quad \begin{aligned} (30-4) \\ (31-4) \end{aligned}$$

V : سرعت جریان؛ R : شعاع هیدرولیکی؛ S : شیب خط تراز انرژی (افت هد

بر واحد طول مجرا؛ A : سطح مقطع جریان؛ Q : دبی جریان و C : ضریب زبری هیزن - ویلیامز (که در جدول ۴-۱ آورده شده است).

اگر را بدانیم و بخواهیم افت بار را محاسبه کنیم، معادله هیزن ویلیامز برای لوله‌ها را می‌توان به صورت زیر نوشت:

در سیستم بین‌المللی

$$h_f = \frac{10.67 L}{(C^{1/85}) (D^{4.75})} \quad (4-31)$$

در این معادله D بر حسب inch و L بر حسب ft می‌باشد.

در سیستم انگلیسی:

$$h_f = \frac{8.26 \times 10^{-5} L}{(C^{1/85}) (D^{4.75})} \quad (4-32)$$

در این معادله D و L بر حسب ft می‌باشد.

جدول ۴-۱: نمونه مقادیر ضریب هیزن و ویلیامز C

۱۴۰	لوله‌های مستقیم و بی نهایت هموار
۱۳۰	فولاد یا چدن نو
۱۲۰	چوب، بتن
۱۱۰	فولاد پرچ شده نو و رنگ شده
۱۰۰	چدن کهنه
۸۰	چدن بسیار کهنه و زنگ زده

از روی دیاگرام هیزن - ویلیامز نیز می‌توان ضریب زبری C را به دست آورد که در شکل (۴-۱۱) آورده شده است.

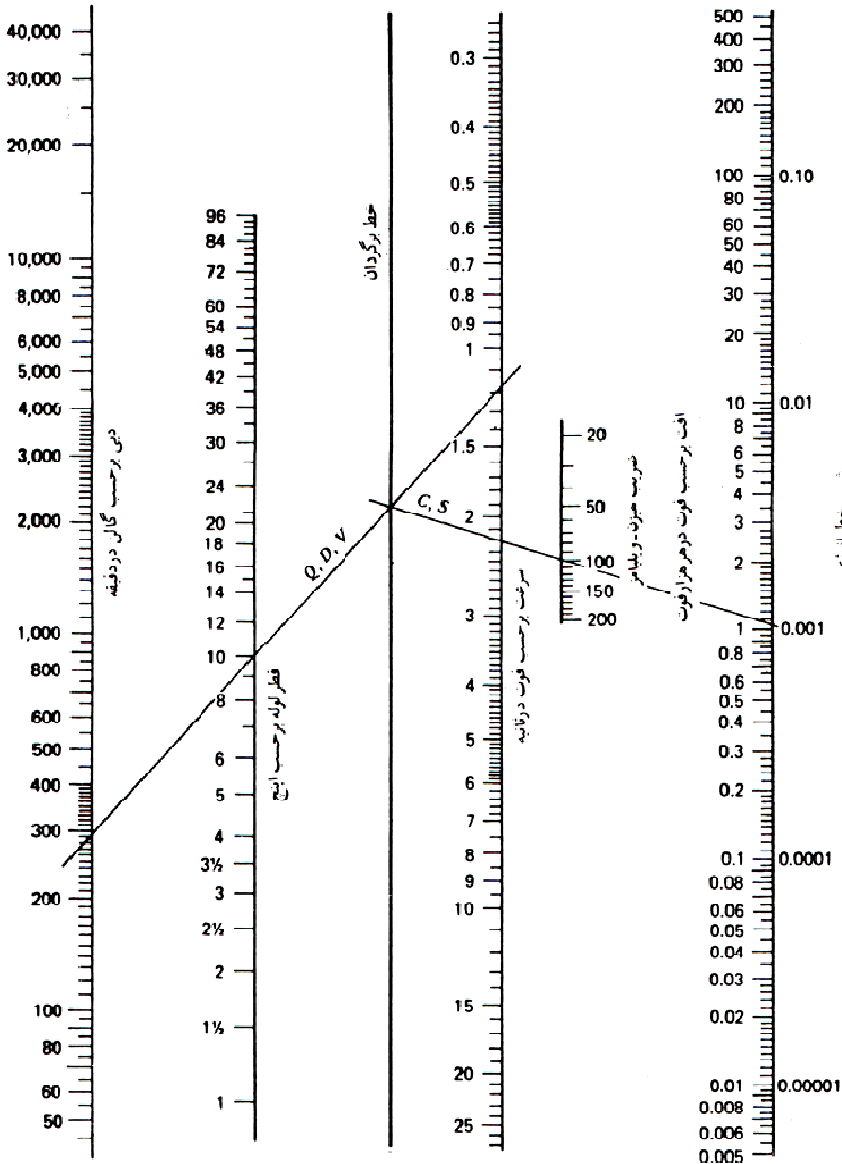
۴-۱۲-۲ فرمول مانینگ

معادله تجربی دیگری که برای جریان در کانال‌های روباز استفاده می‌شود معادله مانینگ می‌باشد.

$$\left. \begin{aligned} V &= \frac{1}{n} R^{\frac{2}{3}} S^{\frac{1}{2}} & (\text{سیستم SI}) \\ V &= \frac{1.486}{n} R^{\frac{2}{3}} S^{\frac{1}{2}} & (\text{سیستم انگلیسی}) \end{aligned} \right\} \Rightarrow Q = VA$$

(۳۳-۴) (۳۴-۴)

n : ضریب زبری مانینگ (که در جدول ۴-۲ آورده شده است).



شکل ۴-۱۱ دیاگرام هیزن - ویلیامز

جدول ۴-۲: مقادیر n در فرمول مانینگ

n		سطح طبیعی
<i>Max</i>	<i>Min</i>	
۰/۰۱۳	۰/۰۱۰	سطح سیمانی هیدراته نشده
۰/۰۱۳	۰/۰۱۰	لوله چوبی دارای نوار فلزی
۰/۰۱۴	۰/۰۱۰	فلومهای تخته ای، هموار
۰/۰۱۷	۰/۰۱۰	لوله فاضلاب لعابدار
۰/۰۱۵	۰/۰۱۱	فلومهای فلزی، هموار
۰/۰۱۳	۰/۰۱۱	بتن، پیش ساخته
۰/۰۱۵	۰/۰۱۱	سطوح ملات سیمانی
۰/۰۱۵	۰/۰۱۱	فلومهای تخته ای، ناهموار
۰/۰۱۷	۰/۰۱۱	سفال رسی زهکشی (در حالت کلی)
۰/۰۱۶	۰/۰۱۲	بتن، یکپارچه
۰/۰۱۷	۰/۰۱۲	آجر با ملات سیمان
۰/۰۱۷	۰/۰۱۳	چدن(نو)
۰/۰۳۰	۰/۰۱۷	سطوح سیمانی لاشه سنگی
۰/۰۲۰	۰/۰۱۷	فولاد پرچ شده
۰/۰۲۵	۰/۰۲۱	لوله‌های فلزی موجدار
۰/۰۲۵	۰/۰۱۷	کانالها و نه‌رها، زمین هموار
۰/۰۳۰	۰/۰۲۲	فلومهای فلزی، موجدار
		کانالها:
۰/۰۳۳	۰/۰۲۵	خاکبرداری در زمین، هموار
۰/۰۳۵	۰/۰۲۵	خاکبرداری در سنگ، هموار
۰/۰۴۰	۰/۰۲۵	بسترهای زیر و علفهای هرز در جداره‌ها
۰/۰۴۵	۰/۰۳۵	خاکبرداری در سنگ، ناهموار، نامنظم
		رودخانه‌های طبیعی:
۰/۰۳۳	۰/۰۲۵	هموارترین
۰/۰۶۰	۰/۰۴۵	ناهموارترین
۰/۱۵۰	۰/۰۷۵	دارای علف هرز زیاد

مثال ۴-۱۰: جریانی از روغن ($\nu = 10^{-5} m^2/s$) به میزان 140 Lit/s از داخل یک لوله صاف به طول ۲۰۰ متر و قطر ۲۰۰ متر عبور می‌نماید. افت بار انرژی در این حالت چند متر روغن است؟

$$\left(f = \frac{0.316}{\text{Re}^{0.25}}, \quad g = 9/8 \frac{m}{s^2}, \quad \pi = 3/14 \right)$$

$$18/48 \text{ (۴)} \quad 9/27 \text{ (۳)} \quad 4/63 \text{ (۲)} \quad 2/31 \text{ (۱)}$$

حل:

$$V = \frac{Q}{A} = \frac{0.14}{\frac{\pi \times 0.2^2}{4}} = 4.459 \text{ m/s}$$

$$\text{Re} = \frac{VD}{\nu} = \frac{4.459 \times 0.2}{10^{-5}} = 89172$$

$$f = \frac{0.316}{\text{Re}^{0.25}} = \frac{0.316}{89172^{0.25}} = 0.0183$$

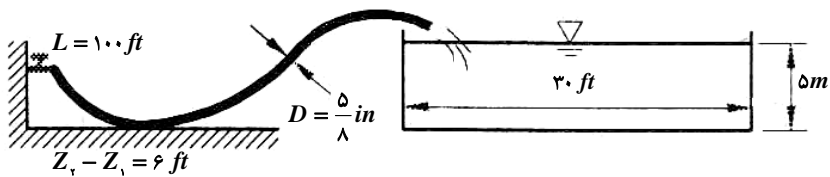
$$h_f = f \frac{L V^2}{D 2g} = 0.0183 \times \frac{200}{0.2} \times \frac{4.459^2}{2 \times 9.8} = 18.56 \text{ m}$$

گزینه ۴ صحیح است.

مثال ۴-۱۱: یک مخزن به قطر ۳۰ فوت و عمق ۵ فوت واقع در بالای سطح زمین

توسط یک لوله با جدار داخلی صاف و طول ۱۰۰ فوت و قطر $\frac{5}{8}$ اینچ پر می‌شود. اگر فشار آب در شیر آبی که شیلنگ به آن متصل است مقدار ۵۵ psi ثابت باشد، چقدر طول می‌کشد تا مخزن پر شود؟ آب از لوله به صورت یک جت آزاد به ارتفاع ۶ فوت بالای شیر آب خارج می‌شود.

$$\left[V = 1/21 \times 10^{-5} \text{ ft}^2/\text{s} \right]$$



شکل ۴-۱۲

حل:

$$z_1 + \frac{p_1}{\gamma} + \frac{V_1^2}{2g} = z_2 + \frac{p_2}{\gamma} + \frac{V_2^2}{2g} + f \frac{L V^2}{D 2g}$$

(چون قطر لوله ثابت است و جریان دائمی است) $V_1 = V_2 = V$

$P_1 = 0$ (چون فشار نسبی در ۲ صفر است)
 $z_1 = 0$ (سطح مبنا) $z_2 = 6 \text{ ft}$ ، $p_1 = 55 \text{ lb/in}^2$ است.
 بنابراین از رابطه (۱) داریم:

$$0 + \frac{P_1}{\gamma} + 0 = z_2 + 0 + 0 + f \frac{L V^2}{D 2g}$$

$$\frac{55 \times 144}{62.4} = 6 + f \left[\frac{100}{\left(\frac{5}{8}\right)^{1/2}} \right] \frac{V^2}{2 \times 32.2}$$

یا

$$f V^2 = 4.06 \quad (2)$$

همچنین عدد رینولدز برابر است با:

$$\text{Re} = \frac{VD}{\nu} = \frac{V \left[\frac{5}{8} \right]}{1/21 \times 10^{-5}} \Rightarrow \text{Re} = 2300 V \quad (3)$$

برای جدار صاف $\varepsilon = 0$ بنابراین $\frac{\varepsilon}{D} = 0$ است.

همچنین نمودار مودی را برای فرایند سعی و خطا بعنوان رابطه (۴) در نظر

می‌گیریم.

در اینجا لازم است برای محاسبه Re ، V ، f از روابط (۲)، (۳) و (۴) به طریق

سعی و خطا استفاده کنیم.

ابتدا فرض می‌کنیم $f = 0.02$ باشد، در نتیجه از معادله (۲)، $V = 14/2 \text{ ft/s}$ و از

معادله (۳) $\text{Re} = 6/11 \times 10^4$ می‌شود. با استفاده از نمودار مودی مقدار $f = 0.0196$

حاصل می‌شود که برابر مقدار فرض شده 0.02 نیست. اکنون $V = 14/4 \text{ ft/s}$ و

$\text{Re} = 6/19 \times 10^4$ می‌شود.

همچنین از نمودار مودی $f = 0.019$ می‌شود که برابر مقدار فرض شده است.

بنابراین مقدار $V = 14/4 \text{ ft/s}$ صحیح است.

در نتیجه:

$$Q = AV = \frac{\pi}{4} \left[\frac{\left(\frac{5}{8}\right)}{12} \right]^2 \times 14 / 4 = 0.307 \frac{ft}{s}$$

$$\text{یا } \forall = Qt \Rightarrow t = \frac{\forall}{Q} = \frac{\frac{\pi}{4} (30)^2 \times 5}{0.307} \quad \text{حجم استخر}$$

$$t = 1/151 \times 10^5 \quad \text{ثانیه}$$

مثال ۴-۱۲: آب در داخل یک لوله پلاستیکی صاف ($\varepsilon = 0$) به قطر 200 mm و با

دبی $0.1 \frac{m^3}{s}$ جریان دارد. ضریب اصطکاک برای جریان در این لوله را محاسبه کنید؟
 حل: برای لوله پلاستیکی صاف زبری مطلق (ε) صفر است، در نتیجه زبری نسبی نیز صفر خواهد بود.
 همچنین می‌دانیم:

$$\frac{Q}{A} = \frac{0.1}{\frac{\pi}{4} (0.2)^2} = 3.18 \frac{m}{s}$$

$$Re = \frac{(3.18 \frac{m}{s})(0.2 m)}{\left(1/12 \times 10^{-6} \frac{m^2}{s}\right)} = 5/68 \times 10^5 \quad \text{بنابراین:}$$

اکنون با استفاده از نمودار مودی می‌توان مقدار f را به دست آورد: $f = 0.028$

مثال ۴-۱۳: دبی روغن برابر 126 لیتر بر ثانیه با لزجت سینماتیکی $0.001 \frac{m^2}{s}$

از داخل لوله‌ای تحت فشار با قطر 40 cm و طول 4000 متر جریان دارد. مقدار انرژی

تلف شده بر حسب متر چقدر است؟ $\left(g = 10 \frac{m}{s^2}\right)$

$$V = \frac{Q}{A} = \frac{0.126}{\frac{\pi}{4} (0.4)^2} = 1 \frac{m}{s} \quad \text{حل:}$$

$$Re = \frac{VD}{\nu} = \frac{1 \times 0.4}{0.001} = 400$$

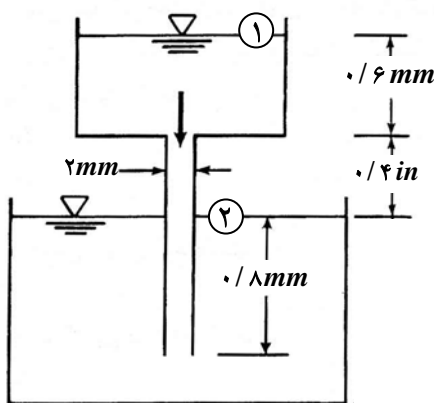
چون $Re = 400 < 2000$ ، بنابراین جریان آرام می‌باشد. در نتیجه انرژی تلف شده

از رابطه زیر به دست می‌آید:

$$h_f = \frac{32 \nu V L}{g D^4} = \frac{32 \times 0.001 \times 1 \times 400}{10 \times (0.4)^4} \Rightarrow h_L = 8 \text{ m}$$

مثال ۴-۱۴: اگر سیال دارای چگالی $\rho = 788 \text{ kg/m}^3$ و همچنین ضریب لزجت دینامیکی $\mu = 1/2 \times 10^{-3} \text{ N.s/m}^2$ باشد، مقدار دبی جریان سیال را بر حسب لیتر در ساعت محاسبه کنید؟

حل: رابطه انرژی را بین نقاط (۱) و (۲) می‌نویسیم:



شکل ۴-۱۳

$$Z_1 + \frac{P_1}{\gamma} + \frac{V_1^2}{2g} = Z_2 + \frac{P_2}{\gamma} + \frac{V_2^2}{2g} + h_f$$

$$(0.6 + 0.4) + 0 + 0 = 0 + 0 + 0 + h_f$$

$$h_f = 1 \text{ m}$$

توجه کنید فشار نسبی در نقاط (۱) و (۲) صفر است و به دلیل بزرگ بودن سطح مخازن $V_1 = 0$ و $V_2 = 0$ هستند. بنابراین:

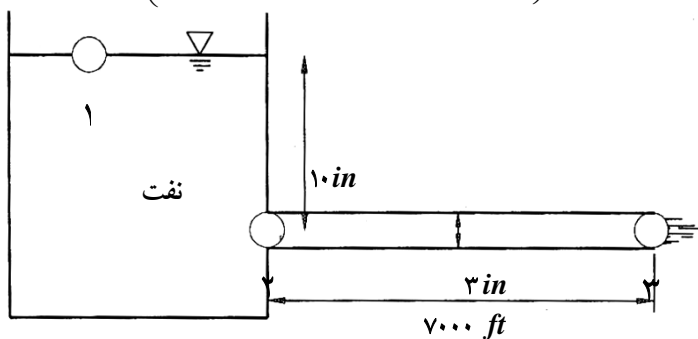
$$h_f = \frac{128 \mu L Q}{\pi \rho g D^4}$$

$$1 = \frac{128 \times 1/2 \times 10^{-3} \times (0.4 + 0.8) Q}{\pi \times 788 \times 9/81 \times 0.002^4}$$

$$Q = 7/59 \text{ Lit/hr}$$

مثال ۴-۱۵: یک مخزن بزرگ نفت به لوله‌ای بطول ۷۰۰۰ فوت و قطر ۳ اینچ مطابق شکل متصل است. فرض کنید جریان در لوله آرام است. سرعت ودبی نفت که به صورت آزاد از لوله خارج می‌شود، چقدر است؟ با محاسبه عدد رینولدز تحقیق کنید که آیا جریان آرام است یا خیر؟ فقط تلفات در طول را در نظر بگیرید و از تلفات در ورودی لوله چشمپوشی نمایند.

$$\left(SG_{\text{نفت}} = 0.8 \text{ و } V_{\text{نفت}} = 1.0 \frac{ft}{s} \right)$$



شکل ۴-۱۴

حل:

$$Z_1 + \frac{P_1}{\gamma} + \frac{V_1^2}{2g} = Z_2 + \frac{P_2}{\gamma} + \frac{V_2^2}{2g} + h_f$$

$$0 + \frac{P_1}{0.8 \times 62.4} + \frac{V_1^2}{2g} = 0 + 0 + \frac{V_2^2}{2g} + h_f$$

دقت کنید در رابطه فوق $Z_1 = Z_2 = 0$ زیرا مبنا محور لوله است. همچنین $P_1 = 0$ است زیرا فشار نسبی در نقطه ۳ مساوی صفر می‌باشد. از طرف دیگر می‌دانیم قطر لوله ثابت است، در نتیجه $\frac{V_1^2}{2g} = \frac{V_2^2}{2g}$ خواهد بود. بنابراین رابطه فوق را به صورت زیر می‌نویسیم:

$$\frac{P_1}{0.8 \times 62.4} = h_f \quad (1)$$

$$h_f = \frac{32 \nu V_r L}{g D^3} = \frac{32 \times 10^{-4} \times V_r \times 1000}{32/2 \times \left(\frac{3}{12}\right)^3} \Rightarrow h_f = 11/13 V_r \quad (2)$$

همچنین رابطه انرژی را بین (۱) و (۲) می‌نویسیم:

$$\begin{aligned} Z_1 + \frac{P_1}{\gamma} + \frac{V_1^2}{2g} &= Z_r + \frac{P_r}{\gamma} + \frac{V_r^2}{2g} + h_f \\ 10 + 0 + 0 &= 0 + \frac{P_r}{0.8 \times 62/4} + \frac{V_r^2}{2 \times 32/2} + 0 \\ \frac{P_r}{0.8 \times 62/4} &= 10 - \frac{V_r^2}{2 \times 32/2} \end{aligned} \quad (3)$$

اگر روابط (۱) و (۲) را مساوی قرار دهیم:

$$\frac{P_r}{0.8 \times 62/4} = 11/13 V_r \quad (4)$$

همچنین روابط (۳) و (۴) را مساوی قرار می‌دهیم:

$$\begin{aligned} 11/13 V_r &= 10 - \frac{V_r^2}{2 \times 32/2} \Rightarrow V_r = 0.89 \frac{ft}{s} \\ Q &= A_r V_r = \frac{\pi D^2}{4} \times V_r = \frac{\pi}{4} \left(\frac{3}{12}\right)^2 \times 0.89 \Rightarrow Q = 0.0437 \text{ cfs} \end{aligned}$$

برای آنکه بدانیم جریان آرام است، عدد رینولدز را محاسبه می‌کنیم:

$$Re = \frac{VD}{\nu} = \frac{0.89 \times \frac{3}{12}}{10^{-4}} \Rightarrow Re = 2225 < 2300$$

بنابراین جریان آرام است.

۵-۱۳ نیروی دراگ سیال (مقاومت سیال)

اصولاً بر هر جسم غوطه‌ور در یک سیال که نسبت به آن در حال حرکت باشد، نیرویی از طرف سیال وارد می‌شود که با حرکت آن مخالفت می‌کند به عبارت دیگر نیروی عکس‌العملی بر این جسم را در برابر نیروی ناشی از جریان، نیروی دراگ (مقاومت) گویند.

نیروی دراگ به سه صورت وجود دارد:

۱. نیروی دراگ جسم در مقابل انحراف مسیر جریان
۲. نیروی دراگ ناشی از نیروهای برشی اصطکاک که به دراگ اصطکاکی معروف

است

۳. نیروی دراگ ناشی از شکل هندسی جسم که به دراگ فشاری معروف است.

عوامل موثر بر نیروی دراگ وارده بر جسم غوطه ور عبارت اند از:

شکل آیرودینامیکی جسم (S)

سطح تصویر جسم بر روی صفحه‌ای عمود بر جهت جریان (A)

سرعت نزدیک شدن سیال به جسم

جرم مخصوص سیال (ρ) و لزجت سیال (μ)

در حالت کلی نیروی دراگ عبارت است از:

$$F_D = f(S, A, V, \rho, \mu) \quad (۳۵-۴)$$

$$F_D = f(\text{Re}, S) \times \frac{1}{2} A \rho V^2 \quad \text{و به عبارت دیگر:}$$

$$F_D = C_D \times \frac{1}{2} A \rho V^2 \quad \text{یا (۳۶-۴)}$$

C_D : ضریب دراگ که تابعی از عدد رینولدز و شکل آیرودینامیکی جسم (S)

می‌باشد.

برای هر جسم با شکل مشخص فقط یک رابطه خاص بین C_D و Re وجود

دارد یعنی:

$$C_D = f(\text{Re} \text{ و } S) \quad (۳۷-۴)$$

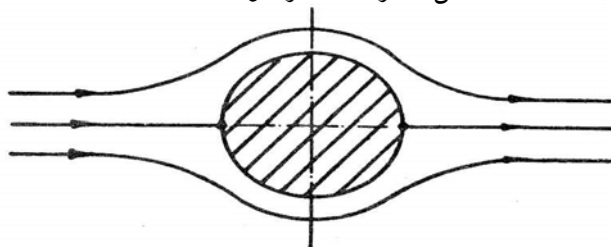
۵-۱۳-۱ نیروی دراگ جسم در مقابل انحراف مسیر جریان

خطوط جریان عبوری را در اطراف استوانه‌ای در نظر می‌گیریم که عدد رینولدز این

جریان $\text{Re} < 0.1$ است. در این حالت تأثیرات لزجت غالب بوده و نیروی دراگ در

مقابل جریان تماماً ناشی از مقاومت برشی سیال است. در چنین حالتی نیروی وارد بر

جسم را نیروی دراگ در مقابل انحراف مسیر گویند.



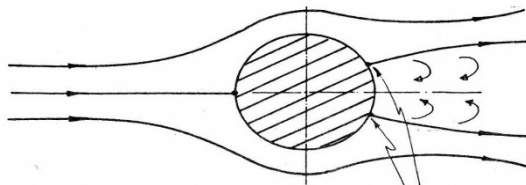
شکل ۴-۱۵ خطوط جریان در اطراف استوانه $\text{Re} < 0.1$

۵-۱۳-۲ نیروی دراگ ناشی از نیروهای برشی (یا نیروی دراگ اصطکاکی)

هنگامی که عدد رینولدز $Re > 0.1$ شود در اطراف جسم لایه بسیار نازکی از سیال به نام لایه مرزی به وجود می‌آید. در این ناحیه سرعت جریان از صفر در مجاورت سطح جانبی جسم تا حد سرعت جریان تغییر می‌کند. منبع تنش‌ها در امتداد لایه مرزی ایجاد نیروی دراگ سطحی که همان نیروی دراگ اصطکاکی است، می‌باشد.

۵-۱۳-۳ نیروی دراگ ناشی از شکل هندسی جسم

چنانچه شکل هندسی جسم به گونه‌ای باشد که موجب شود خطوط جریان سیال از بدنه جسم جدا شوند، در این صورت مانند شکل (۴-۱۴) در پشت جسم، حالت جریان آشفته به وجود آمده و فشار در این منطقه کاهش می‌یابد. اختلاف فشار ایجاد شده، جسم را در معرض نیروی جلو برنده قرار می‌دهد. این نیروی دراگ ناشی از شکل هندسی جسم است.



شکل ۴-۱۴ خط جریان جدا شده از اطراف استوانه

جریان عبوری در لوله‌ها

۱. ضریب اصطکاک در یک لوله کاملاً زبر در جریان متلاطم..... است.
- (۱) تابعی از عدد رینولدز و زبری نسبی (۲) تابعی از زبری نسبی
- (۳) فقط تابعی از عدد رینولدز (۴) مستقل از عدد رینولدز و زبری نسبی
۲. یک لوله جریان، متلاطم گفته می‌شود که در رژیم انتقالی باشد در صورتی که ضریب اصطکاک f ، باشد.
- (۱) فقط مستقل از عدد رینولدز
- (۲) مستقل از زبری نسبی
- (۳) تابعی از عدد رینولدز و زبری نسبی

- ۴) هم مستقل از عدد رینولدز و هم مستقل از زبری نسبی
۳. دو مخزن بوسیله خط لوله‌ای شامل دو لوله A و B با ضریب اصطکاک و طول یکسان، به صورت سری متصل می‌شوند. در صورتی که قطر لوله A ، ۲۰٪ بیشتر از قطر لوله B باشد، نسبت افت هد در A نسبت به افت هد در B مساوی است با:
- | | |
|-----------|-----------|
| ۰/۸۳۳ (۱) | ۰/۶ (۲) |
| ۰/۵۲۹ (۳) | ۰/۴۰۲ (۴) |
۴. دو مخزن بوسیله دو لوله M و N با قطر و طول یکسان به طور موازی متصل می‌شوند. در صورتی که ضریب اصطکاک لوله M ، ۴ برابر ضریب اصطکاک لوله N باشد، نسبت دبی در لوله M به دبی در لوله N مساوی است با:
- | | |
|---------|----------|
| ۰/۵ (۱) | ۰/۲۵ (۲) |
| ۲ (۳) | ۴ (۴) |
۵. در فرمول هیزن - ویلیامز برای خطوط لوله، مقدار ضریب C_H برای لوله آّبست سیمانی..... است.
- | | |
|---------|---------|
| ۱۰ (۱) | ۶۵ (۲) |
| ۱۴۰ (۳) | ۳۴۰ (۴) |
۶. در طراحی خط لوله، مرسوم است که در فرض ناشی از کهنه شدن لوله‌ها.....
- ۱) ضریب اصطکاک f با زمان به طور خطی افزایش می‌یابد.
 - ۲) اندازه زبری معادل دانه ماسه با زمان به طور خطی افزایش می‌یابد.
 - ۳) این لوله‌ها با زمان به طور خطی صاف تر می‌شوند.
 - ۴) هیچ تغییر قابل توجهی در ضریب اصطکاک رخ نمی‌دهد.
۷. دو شبکه لوله هنگامی گفته می‌شوند که در طولهایشان معادل می‌باشند که
- ۱) دبی‌ها و قطرهای یکی باشند.
 - ۲) هر دو شبکه لوله به طور سری باشند.
 - ۳) بوسیله دبی یکسانی در هر دو شبکه لوله، افت هد یکسانی ایجاد شود.
 - ۴) در هر دو شبکه لوله ضریب اصطکاک و دبی یکسانی موجود باشد.
۸. ضریب اصطکاک برای جریان آشفته در کانال‌های زیر.....
- ۱) به عدد رینولدز بستگی دارد
 - ۲) به طور خطی با عکس عدد رینولدز بستگی دارد

(۳) مستقل از زبری سطح است

(۴) مستقل از عدد رینولدز جریان است.

۹. دو سیستم لوله گفته می‌شود که به‌طور سری معادل می‌باشند هنگامی که

(۱) متوسط قطر در هر دو سیستم یکسان است.

(۲) متوسط ضریب اصطکاک در هر دو سیستم یکسان است.

(۳) طول کلی لوله‌ها در هر دو سیستم یکسان است.

(۴) دبی تحت هد یکسان در هر دو سیستم یکسان است.

۱۰. اگر انتهای یک شیلنگ آب را فشار دهیم به‌طوری‌که آب از سطح مقطع کمتری خارج شود:

(۱) سرعت فوران آب افزایش می‌یابد چون دبی جریان ثابت است و سطح مقطع کم می‌شود.

(۲) سرعت فوران هیچ تغییری نمی‌کند.

(۳) سرعت فوران کم می‌شود.

(۴) سرعت فوران می‌تواند افزایش و یا کاهش می‌یابد چون دبی جریان ثابت نیست.

۱۱. در سرعت متوسط یکسان، نسبت افت هد در واحد طول برای لوله در حالت جریان پر به همان لوله در حالت جریان نیمه پر خواهد بود:

(۱) ۲ (۲) $1/63$

(۳) $0/5$ (۴) $0/61$

۱۲. یک لوله با قطر ۲۰ cm دبی 35 Lit/s را از طریق یک ورودی ناگهانی از مخزن بزرگی انتقال می‌دهد. افت هد در این ورودی تقریباً مساوی است با:

(۱) $0/01$ (۲) $0/03 \text{ m}$

(۳) $0/06 \text{ m}$ (۴) $0/09 \text{ m}$

۱۳. در یک لوله مدور قطر لوله به‌طور ناگهانی دو برابر می‌شود. در صورتی که ارتفاع نظیر سرعت جریان در این لوله قبل از افزایش قطر h باشد، بنابراین افت انرژی در افزایش ناگهانی قطر مساوی با..... خواهد بود.

(۱) $\frac{h}{4}$ (۲) $\frac{3h}{4}$

(۳) $\frac{h}{16}$ (۴) $\frac{9h}{16}$

۱۴. در صورتی که ضریب اصطکاک جریان آرام عبوری از لوله مدوری ۰/۱ باشد، بنابراین عدد رینولدز این جریان خواهد بود:

- | | |
|----------|---------|
| (۱) ۲۰۰۰ | (۲) ۳۲۰ |
| (۳) ۶۴۰ | (۴) ۶۴ |

۱۵. در داخل لوله‌ای یک بار جریان توسعه یافته آرام و بار دیگر جریان توسعه یافته درهم داریم. چنانچه سرعت مرکز لوله در هر دو حالت یکسان باشد، کدام گزینه درست است؟

- (۱) دبی جریان رژیم درهم بیشتر از رژیم آرام است.
- (۲) دبی جریان رژیم مساوی رژیم آرام است.
- (۳) دبی جریان رژیم کمتر از رژیم آرام است.
- (۴) دبی جریان به عوامل دیگری بستگی دارد.

۱۶. در لوله‌ای با قطر d ، جهت انتقال روغن با میزان جریان Q روی فاصله L ، افت هد h است. این لوله با لوله دیگری با نصف قطر $\left(\frac{h}{2}\right)$ عوض می‌شود تمام عوامل دیگر ثابت باقی می‌مانند، افت هد در این حالت خواهد بود:

- | | |
|-------------|------------|
| (۱) $0.5 h$ | (۲) $2 h$ |
| (۳) $8 h$ | (۴) $32 h$ |

۱۷. با استفاده از رابطه داریسی - وایسباخ، در صورتی که قطر لوله‌ای به میزان ۲۰ درصد کوچک‌تر شود ولی سایر کمیت‌ها ثابت بماند، افت اصطکاکی در این لوله چند برابر می‌شود؟

- | | |
|--------------|------------------|
| (۱) دو برابر | (۲) چهار برابر |
| (۳) سه برابر | (۴) $1/25$ برابر |

۱۸. در لوله‌ای با طول و جنسهای یکسان به‌طور موازی با یکدیگر متصل می‌باشند. قطر

لوله اول D و قطر لوله دوم $3D$ می‌باشد. نسبت دبی‌ها $\left(\frac{Q_2}{Q_1}\right)$ چقدر است؟

- | | |
|-----------|------------|
| (۱) $1/7$ | (۲) $5/2$ |
| (۳) ۹ | (۴) $15/6$ |

۱۹. لوله‌های شماره (۱) و (۲) بین نقاط A و B به‌طور موازی کار گذاشته شده اند که در آن طول لوله، f ضریب اصطکاک داریسی - وایسباخ، D قطر لوله، V

سرعت جریان و Q دبی جریان را بیان می‌کند. با صرف نظر کردن از افت انرژی موضعی، مشخص کنید که بین این دو لوله کدامیک از روابط زیر صادق است؟

$$\frac{Q_1}{Q_2} = \sqrt{\frac{f_1 L_1 D_1^5}{f_2 L_2 D_2^5}} \quad (2) \quad \frac{Q_1}{Q_2} = \sqrt{\frac{f_1 L_1 D_1^5}{f_2 L_2 D_2^5}} \quad (1)$$

$$\frac{Q_1}{Q_2} = \sqrt{\frac{f_1 L_1 D_1^5}{f_2 L_2 D_2^5}} \quad (4) \quad \frac{Q_1}{Q_2} = \sqrt{\frac{f_1 L_1 D_1^5}{f_2 L_2 D_2^5}} \quad (3)$$

۲۰. کدام جمله در رابطه با ضریب f در رابطه دارسی - وایسباخ غلط است؟

(۱) برای اعداد رینولدز کاملاً بالا، به ازای یک زبری نسبی خاص، ضریب f ثابت است.

(۲) ضریب f در حالت کلی تابع عدد رینولدز و زبری نسبی است و در جریان‌های آرام فقط ابع عدد رینولدز است.

(۳) ضریب f در حالت کلی تابع عدد رینولدز و زبری نسبی است و در جریان‌های کاملاً آشفته فقط تابع زبری نسبی است.

(۴) ضریب f در حالت کلی تابع عدد رینولدز و زبری نسبی است و در جریان‌های آرام و انتقالی فقط تابع زبری نسبی است.

۲۱. سیالی با لزجت $\nu = 5 \times 10^{-4} \text{ m}^2/\text{s}$ در لوله‌ای به قطر ۳۵ سانتیمتر با سرعت $2/5 \text{ m/s}$ در جریان است. افت انرژی برای ۱۰۰ متر لوله مساوی چند متر از ارتفاع سیال است؟

$$3/33 \quad (2) \quad 2/5 \quad (1)$$

$$6/67 \quad (4) \quad 5/75 \quad (3)$$

۲۲. در داخل یک لوله زبر (در جریان Fully Turbulent Flow) ضریب اصطکاک بستگی به کدام یک از عبارات زیر دارد؟

(۱) Re و زبری

(۲) عدد Re

(۳) زبری

(۴) لایه آرام داخل لایه مرزی (Laminar Sub layer)

۲۳. هوا با ویسکوزیته سینماتیک $\nu = 1/5 \times 10^{-5} \text{ m}^2/\text{s}$ با سرعت 25 m/s در یک کانال

کور که سطح مقطع آن مربعی به طول ضلع ۵۰ سانتی متر می باشد، عبور می نماید. در این حالت عدد رینولدز کدام است؟

$$(۱) \quad ۲۱۲۵۰۰ \quad (۲) \quad ۱۲۵۰۰۰۰$$

$$(۳) \quad ۲۲۵۰۰۰۰ \quad (۴) \quad ۶۰۰۰۰۰۰$$

۲۴. در داخل لوله ای به قطر D سیالی با چگالی ρ و لزجت μ جریان دارد. چنانچه افت فشار در طول L از لوله که در آن جریان توسعه یافته است، برابر a باشد تنش برشی برابر است با:

$$(۱) \quad \frac{aD}{4L} \quad (۲) \quad \frac{aL}{4D}$$

$$(۳) \quad \frac{aD}{\pi L} \quad (۴) \quad \frac{aL}{\pi D}$$

۲۵. کدام عبارت در مورد ویسکوزیته موثر سیال در رژیم جریان آشفته صحیح است؟ در ناحیه لایه آرام:

(۱) تنش برشی سیال بزرگتر از تنش برشی سطح جسم است

(۲) ویسکوزیته موثر کوچکتر از ویسکوزیته مولکولی سیال است

(۳) ویسکوزیته موثر برابر ویسکوزیته مولکولی سیال است

(۴) ویسکوزیته موثر بزرگتر از ویسکوزیته مولکولی سیال است

۲۶. طول ورودی جریان آرام فاصله ای است که.....

(۱) افت فشار به طور خطی تغییر می کند

(۲) جریان آرام به آشفته تبدیل می شود

(۳) جریان سیال توسعه می یابد

(۴) ضریب اصطکاک به طور خطی تغییر می کند

۲۷. اگر در جریان آرام و نیز توربولنت در داخل لوله هر دو نقش برشی روی دیواره برابر فرض شود، نسبت گرادیان فشار جریان آرام به جریان توربولنت کدام است؟

$$(۱) \quad ۱ \quad (۲) \quad ۲$$

$$(۳) \quad \frac{۱}{۲} \quad (۴) \quad \frac{۱}{۴}$$

۲۸. دو لوله با قطر و طول و دبی یکسان داریم. لوله اولی از جنس سیمان و دومی از جنس شیشه کاملاً صاف می باشد. جریان آب در هر دو لوله ورقه ای $Laminar$ و با لزجت یکسان است. کدام گزینه در خصوص افت انرژی در این لوله صحیح

است؟

- (۱) افت انرژی هر دو لوله یکسان است.
 - (۲) افت انرژی لولهٔ سیمانی به علت تفاوت زبری، بیشتر است.
 - (۳) چون لولهٔ شیشه‌ای صاف است، جریان با سرعت بیشتر حرکت خواهد کرد و در نتیجه افت انرژی در آن بیشتر خواهد بود.
 - (۴) با اطلاعات داده شده، اظهار نظر در خصوص مقایسه افت انرژی دو لوله امکان پذیر نیست.
۲۹. جریان یک سیال لزج در داخل یک لوله با عدد رینولدز $Re = 1500$ برقرار است. اگر طول لوله ۲۰ متر، قطر آن ۵ سانتی متر و لزجت سینماتیکی آن برابر $2 \times 10^{-5} \frac{m^2}{s}$ باشد، افت انرژی در طول لوله معادل چند متر خواهد بود؟

$$g = 9/8 \frac{m}{s^2}$$

- | | |
|-----------------|-----------------|
| (۱) ۲۱۱ / ۰ متر | (۲) ۳۱۶ / ۰ متر |
| (۳) ۴۷۴ / ۰ متر | (۴) ۶۳۲ / ۰ متر |
۳۰. سیالی با لزجت سینماتیکی $5 \times 10^{-4} \frac{m^2}{s}$ ، در لوله‌ای به قطر ۳۵ سانتی متر با سرعت $2/5 \frac{m}{s}$ در جریان است. افت انرژی برای ۱۰۰ متر لوله مساوی چند متر از ارتفاع سیال است؟

- | | |
|------------|------------|
| (۱) ۲ / ۵ | (۲) ۳ / ۳۳ |
| (۳) ۵ / ۷۵ | (۴) ۶ / ۶۷ |

۳۱. در یک جریان آشفته (*Turbulent*) کدامیک از موارد زیر صحیح است؟
- (۱) لایه‌های سیال به‌طور موازی با هم حرکت می‌کنند.
 - (۲) تنش بین لایه‌ها از حالت مشابه در جریان ورقه‌ای بیشتر است.
 - (۳) چسبندگی بین لایه‌ها اثر مهم و تعیین کننده‌ای دارد.
 - (۴) ضریب دارسی - وایسباخ در همه موارد فقط تابعی از عدد رینولدز است.
۳۲. دو لوله با طول و جنس‌های یکسان به‌طور موازی به یکدیگر متصل می‌باشند. قطر

لوله اول D و قطر لوله دوم $3D$ می‌باشد. نسبت دبی‌ها $\left(\frac{Q_2}{Q_1}\right)$ چقدر است؟

- | | |
|-----------|------------|
| (۱) ۱ / ۷ | (۲) ۵ / ۲ |
| (۳) ۹۱۰ | (۴) ۱۵ / ۶ |

۳۳. با استفاده از رابطه داریسی - وایسباخ، نشان دهید که اگر قطر لوله‌ای به میزان ۲۰ درصد کوچکتر شود ولی سایر کمیت‌ها ثابت بماند، افت اصطکاکی در این لوله:

(۱) دو برابر می‌شود. (۲) چهار برابر می‌شود.

(۳) سه برابر می‌شود. (۴) ۲۵ / ۱ برابر می‌شود.

۳۴. روغن با چگالی نسبی ۰/۸۵ در یک لوله به قطر داخلی ۷۵ cm با سرعت متوسط

$1/5 \text{ m/sec}$ را جریان می‌یابد. افت فشار در طول ۳۰۰ متری لوله برابر $10/7 \text{ Kp}$

می‌باشد. ضریب افت اصطکاکی لوله چقدر می‌باشد؟

(۱) ۰/۰۲۴ (۲) ۰/۰۱۴

(۳) ۰/۰۳۶ (۴) ۰/۰۲۸

۳۵. اگر در جریان کاملاً آشفته در لوله‌ها ارتفاع زبری معادل لوله‌ای دو برابر شود در

این صورت دبی چه تغییری می‌کند؟

(۱) نصف می‌شود. (۲) تغییری نمی‌کند.

(۳) دو برابر می‌شود. (۴) بسته به مشخصات لوله و جریان

دارد.

۳۶. اگر در جریان لایه‌ای در لوله‌ها فقط قطر دو برابر گردد (افت کل و طول لوله ثابت

بماند) نسبت دبی جدید به دبی قدیم چقدر است؟

(۱) ۱۶ (۲) ۳۲

(۳) ۸ (۴) ۴

۳۷. در جریان آرام افت انرژی با سرعت:

(۱) رابطه معکوس دارد. (۲) رابطه مستقیم دارد.

(۳) با توان دوم سرعت رابطه معکوس دارد. (۴) ارتباط ندارد.

۳۸. افت بار خطی (Pressure Loss) در جریان درهم (متلاطم) در داخل یک لوله:

(۱) به‌طور مستقیم با سرعت جریان بستگی دارد.

(۲) به‌طور معکوس با توان دوم سرعت تغییر می‌کند.

(۳) به‌طور معکوس با توان دوم قطر لوله بستگی دارد.

(۴) به‌طور تقریبی با توان دوم سرعت تغییر می‌کند.

۳۹. در جریان مغشوش در حالت ناحیه جریان لوله جدار زبر می‌توان گفت:

(۱) ضریب اصطکاک به زبری نسبی بستگی ندارد.

۲) افت انرژی تقریباً تابعی از توان دوم سرعت و ضریب اصطکاک تابعی از زبری نسبی

۳) لوله زبرتر ضریب اصطکاک مساوی لوله صافی تر است.

۴) ضریب اصطکاک تابعی است فقط از « رینولدز » جریان

۴۰. جریان هوا با سرعت 10 m/s در لوله‌ای جریان دارد. چگالی هوا $1/2 \text{ Kg/m}^3$ است.

در صورتی که ضریب اصطکاک مودی برابر این جریان برابر $0/02$ باشد، تنش

برشی وارد بر جداره لوله چند نیوتن بر متر مربع (N/m) می‌باشد؟

$$0/3 \quad (1) \quad 0/5 \quad (2)$$

$$1/2 \quad (3) \quad 2/4 \quad (4)$$

۴۱. جریانی از روغن $\left(\nu = 10^{-5} \text{ m}^2/\text{s} \right)$ به میزان 140 Lit/s از داخل یک لوله صاف

به طول 200 متر و قطر 200 میلی متر عبور می‌نماید. افت بار انرژی در این

حالت چند متر روغن است؟

$$\left(f = 0/316 / \text{Re}^{1/4} \text{ و } g = 9/8 \text{ m/s}^2 \text{ و } \pi = 3/14 \right)$$

$$2 / 31 \quad (1) \quad 4 / 63 \quad (2)$$

$$9 / 27 \quad (3) \quad 18 / 47 \quad (4)$$

۴۲. در جریان آرام یک سیال نیوتنی از داخل لوله افقی در صورتی که قطر لوله نصف

گردد دبی جریان ثابت بماند، افت فشار در واحد طول چند برابر می‌شود؟

$$4 \quad (1) \quad 8 \quad (2)$$

$$32 \quad (3) \quad 16 \quad (4)$$

۴۳. در لوله‌ای سیال با جریان آرام جاری است. در صورتی که قطر لوله دوبرابر شود

ولی جریان همچنان آرام باقی بماند و تغییری نیز در سرعت ایجاد نگردد افت

فشار چگونه است؟

$$(1) \text{ به } \frac{1}{4} \text{ تقلیل می‌یابد.} \quad (2) \text{ برابر می‌شود.}$$

$$(3) \text{ برابر می‌شود.} \quad (4) \text{ به } \frac{1}{4} \text{ تقلیل می‌یابد.}$$

۴۴. آب با سرعت $2/5 \text{ cm/s}$ در یک لوله افقی به قطر 5 cm جریان دارد. مقدار افت

فشار بر واحد طول لوله برابر چند پاسکال می‌باشد؟

$$\left(\rho_{H_2O} = 1000 \text{ Kg} / \text{m}^3 \right), v_{H_2O} = 1/0 \times 10^{-6} \text{ m}^3 / \text{s}, \pi = 3/14$$

$$\begin{array}{ll} 0/32 \text{ (۲)} & 0/16 \text{ (۱)} \\ 0/96 \text{ (۴)} & 0/64 \text{ (۳)} \end{array}$$

۴۵. در جریان متلاطم در لوله با رینولدزهای بسیار بالا فاکتور اصطکاک تابعی از:

$$\begin{array}{ll} f = f\left(\frac{\varepsilon}{D}\right) \text{ (۲)} & f = f(\text{Re}) \text{ (۱)} \\ f = f\left(\text{Re}, \frac{\varepsilon}{d}\right) \text{ (۴)} & f = f(\text{Re}, \varepsilon) \text{ (۳)} \end{array}$$

۴۶. آب در لوله‌ای به قطر 10cm جریان دارد. به طور تقریبی در چه شدت جریانی

$$v_{H_2O} = 10^{-6} \frac{\text{m}^3}{\text{s}}$$

انتقال از رژیم آرام به درهم افتاد؟

$$\begin{array}{ll} 40 \text{ (۲)} & 0/04 \text{ (۱)} \\ 1000 \text{ (۴)} & 100 \text{ (۳)} \end{array}$$

۴۷. افت فشار در یک خط لوله به قطر ۶۰ سانتیمتر و طول ۱۵ متر برابر ۷۰ کیلو

پاسکال می‌باشد. تنش برشی (Shear Stress) در بدنه لوله چند پاسکال است؟

$$\begin{array}{ll} 70/0 \text{ (۲)} & 22/0 \text{ (۱)} \\ 700/0 \text{ (۴)} & 420/0 \text{ (۳)} \end{array}$$

۴۸. اگر سیالی که ویسکوزیته آن با افزایش نرخ برش کاهش می‌یابد در لوله‌ای جریان

یابد. مقدار افت فشار آن در مقایسه با سیالی که ویسکوزیته آن ثابت است:

$$\begin{array}{ll} \text{(۱) کمتر است} & \text{(۲) بیشتر است} \\ \text{(۳) تفاوتی نمی‌کند} & \text{(۴) هیچکدام} \end{array}$$

۴۹. سرعت برای جریان آرام سیال درون یک لوله:

(۱) در تمام سطح مقطع ثابت است.

(۲) در دیواره، ماکزیمم مقدار را داراست.

(۳) در جداره صفر و به طرف مرکز به طور خطی افزایش می‌یابد.

(۴) در جداره صفر و به طرف مرکز به طور سهموی افزایش می‌یابد.

۵۰. در جریان آرام داخل لوله کدام یک از گزینه‌های زیر صحیح می‌باشد؟

(۱) ماکزیمم سرعت و ماکزیمم تنش برشی در مرکز لوله وجود دارند

(۲) بیشینه سرعت در مرکز لوله و ماکزیمم تنش برشی روی دیواره لوله اتفاق

می‌افتد

۳) محل ماکزیمم شدن سرعت و تنش برشی در جریانهای پایدار در مرکز لوله واقع می‌شوند.

۴) محل ماکزیمم شدن سرعت و تنش برشی بستگی به نوع جریان دارد و در جریانهای آرام و درهم متفاوت است.

۵۱. برای جریان در یک لوله معین، در حالتی که افت ارتفاع اصطکاکی متناسب با مجذور دبی است، ضریب اصطکاک f :

۱) ثابت است ۲) متناسب با Re است

۳) متناسب با Re^{-1} است. ۴) متناسب با $Re^{-0.25}$ است.

۵۲. اگر در جریان کاملاً آشفته در لوله‌ها ارتفاع زبری معادل لوله‌ای دو برابر شود در این صورت دبی چه تغییری می‌کند؟

۱) نصف می‌شود ۲) تغییری نمی‌کند

۳) دو برابر می‌شود ۴) بسته به مشخصات لوله و جریان دارد.

۵۳. شیب خط انرژی جریان تحت فشار در شرایط آشفته کامل:

۱) با افزایش عدد رینولدز کاهش می‌یابد

۲) به عدد رینولدز بستگی ندارد

۳) به زبری جداره لوله بستگی ندارد

۴) با افزایش عدد رینولدز افزایش می‌یابد.

۵۴. در جریان آرام افت انرژی با سرعت:

۱) رابطه معکوس دارد ۲) رابطه مستقیم دارد

۳) با توان دوم سرعت رابطه معکوس دارد ۴) ارتباط ندارد