دانشگاه صنعتی اصفهان

دانشکده مهندسی مکانیک

آزمایشگاه مکانیک سیالات

احمدرضا عظیمیان

۱۵۱۰۰۸

فهرست مطالب

گزارش نویسی مهندسی ۲

جزئیات مکانیکی گزارش ۱۰

میز هیدرولیکی ۱۳

آزمایش اول: آزمایش افت اصطکاک در سیستمهای لوله کشی ۱۷

آزمایش دوم:آزمایش پمپ گریز از مرکز ۳۰

آزمایش سوم: افت اصطکاک در لوله با جریانهای آرام و مغشوش ۳۵

آزمایش چهارم: آزمایش سرریز ۴۰

آزمایش پنجم :جریان عبوری از یک وانتوری ۴۸

آزمایش ششم :آزمایش ضربه جت آب ۵۵

آزمایش هفتم :اندازه گیری نیروی ناشی از هیدرواستاتیک بر یک صفحه و تعیین نقطه اثر آن ۶۲

آزمایش هشتم :دستگاه اندازه گیری دبی در لوله ها ۶۷

آزمایش نهم: جریان در لوله و نازل ۸۳

آزمایش دهم: جریان در کانال باز ۹۰

آزمایش یازدهم: اندازه گیری نیروی مقاوم روی اجسام دو بعدی ۱۰۵

گزارش‌نویسی مهندسی

مقدمه

ارائه مکتوب هر فعالیت مهندسی از طریق نوشتن گزارش آن انجام می‌پذیرد. صحیح نوشتن گزارش و رعایت مسائل مربوطه از اهمیت خاصی برخوردار است که جز از طریق آموزش صحیح و کسب تجربه و مهارت لازم حاصل نمی‌شود. گزارش‌نویسی در آزمایشگاه از نتایج یک عمل اندازه‌گیری زمینه‌ی مساعدی است که دانشجو با نوشتن آن با گزارش-نویسی آشنا شده و تجربه و تبحر لازم را به دست آورد. در این قسمت اصول و قواعد کلی گزارش‌نویسی مهندسی مورد بحث و بررسی قرارگرفته و تأکید خاصی نیز بر گزارش‌نویسی در آزمایشگاه است.

نکات مهم یک گزارش مهندسی

در یک گزارش مهندسی پس از تعیین هدف و یا اهداف مورد نظر، باید روش انجام کار را تشریح کرد و سپس وسایل و لوازم مورد استفاده را شرح داده و در پایان نتایج حاصل را تبیین کرد. مراحل فوق را به صورت زیر می‌توان نشان داد:

۱- هدف

۲- تجزیه و تحلیل تئوری

۳- روش انجام کار یا آزمایش در آزمایشگاه

۴- شرح وسایل و ابزار مورد استفاده و نحوه‌ی کار با آن‌ها

۵- ارائه اطلاعات و نتایج خام حاصل از آزمایش

۶- انجام محاسبات لازم و تحلیل اطلاعات خام

۷- بحث و تفسیر نتایج حاصل و جمع‌بندی و نتیجه‌گیری کلی

منظورکردن تمام قسمت‌های بالا در تهیه‌ی یک گزارش منطقی به نظر می‌رسد، ولی بسته به مورد در پاره‌ای از مواقع بخشی از آن‌ها را می‌توان در یک گزارش گنجانده و یا حذف شود. به عنوان مثال در کارخانه‌ای که ممکن است

گزارش‌های زیادی تهیه شود تا مدیر کارخانه آن‌ها را از نظر بگذراند، ارائه گزارش مفصل و طولانی نیاز به وقت زیادی دارد که از حوصله‌ی وقت یک مدیر خارج است. در چنین مواردی باید گزارش خلاصه‌ای تهیه کرد که حاوی نکات برجسته‌ی گزارش اصلی بوده و این گزارش کوتاه را پیوست گزارش اصلی کرد تا از اتلاف وقت مدیر جلوگیری شود.

از آنجا که در این نوشتار تاکید بر گزارش‌نویسی در آزمایشگاه است، از این به بعد بیشتر درمورد گزارش‌نویسی در آزمایشگاه بحث خواهدشد و البته گزارش آزمایشگاهی هم نوعی از گزارش‌نویسی مهندسی است.

در آزمایشگاه دانشجویان ضمن انجام آزمایش با دستگاه‌های مختلف آزمایشگاهی و آشناشدن به طرز کار آن‌ها، اصول و قوانین فیزیکی مختلف را تجربه کرده و سپس گزارش‌های لازم را تهیه می‌نمایند. لازم به تذکر است که آشنایی دانشجویان به طرز تهیه‌ی گزارش و همچنین آشناشدن با محیط آزمایشگاه در کار آینده‌ی آن‌ها بسیار مؤثر خواهدبود.

انواع گزارش

به‌طور کلی گزارش‌ها را به دو دسته‌ی مختصر و کامل تقسیم‌بندی می‌کنیم.

۱- گزارش کامل: گزارش کامل همان‌گونه که از نام آن برمی‌آید باید دربرگیرنده کلیه مواد لازم در یک گزارش به طور کامل بوده و شامل مطالب زیر می‌باشد:

۱- عنوان

۲- هدف

۳- خلاصه گزارش

۴- مقدمه

۵- تئوری و تجزیه و تحلیل

۶- شرح دستگاه‌ها

۷- شرح وسایل اندازه‌گیری و تشریح نحوه‌ی کار آن‌ها

۸- روش انجام آزمایش و رعایت نکات مهم آن

۹- اعداد به‌دست آمده از آزمایش

۱۰- تحلیل نتایج آزمایش و انجام محاسبات لازم

۱۱- استخراج نتایج و رسم منحنی‌های مورد نیاز

۱۲- بحث درباره‌ی نتایج و تفسیر آن‌ها

۱۳- نتیجه‌گیری و پیشنهاد

۱۴- قدردانی

۱۵- مأخذ یا مراجع

۲- گزارش مختصر: این نوع گزارش شامل نکته‌های برجسته‌ی گزارش کامل است و به‌طورکلی لازم است که سه مورد زیر در آن گنجانده‌شود:

الف- هدف: هدف از انجام آزمایش می‌باید ذکرشود تا تصویری کامل از آزمایش در ذهن خواننده ایجادگردد. مشروط به آنکه خواننده از محدودیت‌های گزارش کوتاه آگاه‌باشد.

ب- نتایج: نتایج باید به‌طور واضح ذکر شده یا در جداولی منعکس گردد. اگر گزارش از چند قسمت تشکیل شده، بهتر است که گزارش‌نویس برای هر قسمت عنوانی مشخص انتخاب کند تا خواننده بتواند مطالب را از هم تمیز دهد. لازم است هر قسمت حتی‌الامکان از سایر قسمت‌ها مستقل باشد تا خواننده مجبورنگردد برای فهمیدن یک قسمت به دیگر قسمت‌ها مراجعه کند.

ج- نتیجه‌گیری: این قسمت همیشه در هر گزارش باید گنجانده‌شود. گزارش‌نویس باید ماحصل نتایج به‌دست‌آمده را ذکرکند. همچنین باید درباره بعضی از مقادیر موردنظر بحث شود زیرا خواننده‌ی گزارش خیلی علاقه‌مند است که از نتیجه‌گیری و نظرات گزارش‌نویس مطلع گردد.

پس از ذکر انواع گزارش‌ها، به ذکر قسمت‌های مختلف یک گزارش پرداخته و نکات مهم در تهیه و تنظیم آن‌را ارائه می‌کنیم.

عنوان و هدف

۱- در صفحه اول نام و تاریخ و سایر مشخصات لازم ثبت شود.

۲- عنوان باید مختصر و مفید باشد.

۳- اگر گزارش بلند یا پیچیده است پس از عنوان فهرست گزارش آورده شود.

۴- هدف مختصر و با جملات کامل در زمان گذشته‌ی ساده بیان‌شود.

خلاصه کردن

۱- برای تهیه خلاصه‌ی مطالب قاعده مناسب این است که جملات نخستین گویای کارهای انجام شده باشد.

۲- مطلب خلاصه شده، خلاصه‌ی تمام مطالب نیست بلکه بیان مختصری از نتایج و کاربرد آزمایش انجام شده است.

۳- نتیجه‌گیری و نظرات هم بایستی به‌طور مختصر نوشته‌شوند.

۴- اختصار بایستی به صورت خبری باشد نه توصیفی.

مقدمه

مقدمه شامل تاریخچه‌ی مطلب مورد آزمایش و علت انجام آزمایش و اطلاعاتی درباره‌ی کارهای قبلی انجام‌شده است. لازم به تذکر است تهیه مقدمه همیشه لازم نیست.

تئوری و تجزیه و تحلیل

در این قسمت مطالب زیر باید گنجانده‌شود:

۱- اصول و قوانین مربوط به معادلات حاکم بایستی درنظرگرفته شود و توضیحات لازم درباره عبارت نامفهوم داده شود.

۲- دیاگرام‌های تحلیلی، نظیر سیکل‌های تئوری و دیاگرام‌های عکس‌العمل سیستم‌های دینامیکی آورده شوند.

۳- شکل و اهمیت ضرایب تجربی، فاکتورهای تصحیح و راندمان‌ها باید نشان‌داده‌شوند.

وسایل آزمایش

۱- این قسمت در انجام آزمایش‌ها مهم است. مخصوصاً در مورد وسایل نو تعیین هویت کامل و توجه به این در تسریع آزمایش موثر است زیرا در این قسمت باید مشخصات و طرز کار وسایل به‌خصوص وسایلی که جدید هستند نوشته شود.

۲- در آزمایش‌هایی که محصولات مختلفی به‌دست می‌آید لازم است برای نمونه طرز به‌دست آمدن یکی از آن‌ها را توضیح داد.

۳- عکس‌ها، نقشه‌های سوار شده و تصاویر همراه با نام و اندازه‌ها، برای مشخص کردن کامل وسایل به ما کمک می‌کنند.

۴- درباره حدود کارکرد دستگاه‌ها توضیحات لازم باید داده شود.

۵- شکل شماتیک دستگاه آزمایش که محل و ارتباط دستگاه‌ها و طرز قرار گرفتن وسایل اندازه‌گیری را نشان می‌دهد ضروری است.

روش انجام آزمایش

در این قسمت مطالب زیر باید گنجانیده شود:

۱- نحوه‌ی انجام آزمایش و تعداد دفعاتی که آزمایش باید تکرار شود.

۲- آزمایش‌های مقدماتی، مدت زمان هر آزمایش و فاصله‌ی اعداد خوانده شده باید ذکر گردد.

۳- نکات لازم برای به‌دست آوردن دقت بیشتر باید ذکر گردد و همچنین شرح وسایل کنترل کننده شرایط خاص آزمایش، لازم است.

۴- متغیرهای مستقل و دلایل انتخاب آن‌ها بایستی ذکر گردد.

اطلاعات و نتایج

۱- خلاصه نتایج آزمایش همراه با جداول و منحنی‌های لازمه باید در این قسمت آورده شوند.

۲- جداول بایستی شامل اطلاعات ضروری باشند. صفحات مربوط به اطلاعات اصلی باید در قسمت ضمیمه قرار داده‌شوند.

۳- کاربرد مقیاس‌های لگاریتمی و غیره و رسم منحنی‌ها به درک مطالب کمک می‌نماید و اگر انتخاب مقیاس لگاریتمی باعث شود که منحنی نمایش تغیرات تابع به‌صورت خط درآید باید از مقیاس لگاریتمی استفاده کرد.

۴- اگر منحنی نمایش تابع در بعضی نقاط هموار نیست، لازم است این نکته دقیقاً بررسی و علل آن شرح داده شود.

بحث و نتیجه‌گیری و پیشنهادات

۱- نتیجه‌گیری‌ها باید با توجه به هدف آزمایش که قبلاً بیان شده صورت گیرد.

۲- یک قاعده‌ی مهم در نوشتن بحث این است که هر قسمت ازآن که می‌تواند بدون انجام نوشته‌شود، برآوردی از کار انجام شده نخواهد بود و بالطبع نتیجه‌ای از آن نمی‌توان گرفت.

۳- نتیجه‌گیری باید خلاصه و مربوط به موضوع باشد.

۴- نتیجه‌گیری باید با استفاده از اطلاعات داده شده و نتایج به دست آمده صورت گیرد.

۵- نتیجه‌گیری باید از نتایج عددی به‌دست آمده صورت‌گیرد و طوری عنوان گردد که خواننده‌ی گزارش برای درک آن احتیاج به محاسبات ذهنی نداشته‌باشد.

۶- نتیجه‌گیری عبارت است از قضاوت‌های شخص آزمایش‌کننده که باید همراه با دلیل باشد و این دلایل ممکن است متکی به تئوری یا نتایج آزمایش‌های مشابه قبلی که توسط دیگران انجام گرفته‌است، باشد.

۷- یکی از راه‌هایی که می‌توان به‌وسیله‌ی آن نتیجه‌گیری خوبی به عمل آورد، درنظر گرفتن دقت روش به‌کار رفته و اطلاعات داده شده و نتایج به‌دست آمده است.

پیشنهادات

پیشنهادات غالباً مهم‌تر از نتیجه‌گیری‌ها می‌باشند زیرا آزمایش‌کننده احساس می‌کند که کارهای بهتر و بیشتری می‌توانست انجام دهد. در آزمایش‌هایی که جنبه‌ی آموزشی دارد دانشجو با کمی دقت و با محدود بودن کارآیی دستگاه و مسایلی از این قبیل مواجه است و لازم است که پیشنهادات خود را در مورد بر طرف کردن این مسائل ارائه‌کند تا بدین وسیله بهبودهای لازم در رسیدن به هدف اصلی که در قسمت اول ذکر شده‌است فراهم شود.

قدردانی

اگرچه قدردانی در گزارش‌های آزمایشگاهی لزومی ندارد ولی در رساله‌های دکترا، مقاله‌های تخصصی و گزارش‌هایی که برای شرکت‌ها تهیه می‌شود لازم است. معمولاً افرادی هستند که هم در کارهای تجربی و هم در مقاله‌نویسی وارد هستند و برای تهیه‌ی یک گزارش خوب می‌توان از آن‌ها کمک گرفت.قدردانی از این افراد و افراد دیگری که در شکل‌گیری کار به‌گونه‌ای مؤثر هستند ضروری است.

مراجع

ذکر نام کتب و منابعی که برای تهیه‌ی گزارش از آن‌ها استفاده شده لازم است به ویژه برای گزارش‌های تحقیقاتی تا خواننده بتواند از آن‌ها استفاده کند، بنابراین لیستی از نام کتب و منابع مورد استفاده در گزارش در پایان گزارش آورده می‌شود.

پیوست

۱- تمام اطلاعات اصلی و دیاگرام‌ها در پیوست آورده می‌شوند. اگر چندین نسخه از یک گزارش لازم باشد، فتوکپی مطالب پیوست نیز باید ارائه شود.

۲- نوشتن نمونه محاسبات در پیوست لازم است.

۳- اطلاعات به‌دست آمده از مدرج کردن دستگاه‌ها، منحنی‌های مربوط به دستگاه‌ها و نتایج آزمایش‌های مقدماتی معمولاً در پیوست نوشته می‌شود.

۴- تفسیرهای به‌خصوص و جزئیاتی که مشخص کننده‌ی روش آزمایش است در پیوست نوشته می‌شود. (وقتی که در درجه‌ی دوم اهمیت نسبت به موضوع آزمایش باشد).

۵- نتایج ریاضی معادلات باید در پیوست ذکر گردد.

۶- معمولاً اگر از مجلات مخصوص یا قوانین آزمایشی استفاده شده‌باشد در پیوست ذکر گردد.

جزئیات مکانیکی گزارش

طرح کلی گزارش‌ها

کمتر کسی پیدا می‌شود که گزارشی را از اول تا آخر بخواند لذا لازم است که نویسنده، گزارش را طوری تنظیم نماید که پیداکردن بخش مورد علاقه‌ی خواننده آسان باشد. بهتراست اندازه‌ی کاغذها یکسان و به صورت (A۴) (۲۱۰mm x ۲۹۷mm) باشد. نوشتن عنوان‌های اصلی و فرعی و جداول با ذکر عنوان آن‌ها، حاشیه‌های کافی مخصوصاً روی ورقه‌هایی که منحنی کشیده شده، فهرست، دقت در تمیز نوشتن و شماره‌گذاری صفحات ضروری است.

جداول و شکل‌ها باید به ترتیب شماره‌گذاری شده و نزدیک اولین مرجع ذکر شده‌باشد، مگر اینکه جداول و شکل‌ها مربوط به پیوست باشد. در سرتاسر گزارش تمام اعداد و نتایج باید همراه با دیمانسیون مربوطه‌شان باشد. تمام جملات گزارش باید در زمان گذشته ساده و به‌صورت سوم شخص مجهول نوشته شوند.

قواعد رسم منحنی

در یک گزارش رسمی منحنی‌ها باید با جوهر سیاه کشیده‌شود اما در گزارش‌های آزمایشگاهی رسم منحنی دقیق و تمیز با مداد کافی است. در بیشتر ادارات مهندسی قاعده موکد است که ابتدا تمام منحنی‌ها با مداد رسم شوند، این عمل برای تعقیب عملیات بعدی مهم است. استفاده از رنگ‌های مختلف برای کشیدن منحنی‌ها کار درستی نمی‌باشد زیرا در بیشتر موارد لازم است که آن‌ها را به‌صورت سیاه و سفید تکثیر نماییم.

هریک از منحنی‌ها باید توسط نقاط به‌دست آمده از آزمایش روی کاغذ مربوطه مشخص گردد ولی مشخص کردن نقاط برای رسم منحنی‌های حاصل از تئوری لازم نیست. استفاده از خطوط و سمبل‌های مختلف برای بهتر رسم کردن منحنی‌ها مفید است. هر منحنی باید توسط عنوانی مشخص شود، این عنوان باید به‌طور مختصر و مفید توضیحاتی در مورد منحنی بدهد به‌طوریکه خواننده‌ی گزارش برای درک آن احتیاج به مراجعه به سایر قسمت‌های گزارش نداشته‌باشد. محورهای تابع و متغیر باید با اسم و واحدهایشان به‌طور واضح مشخص شوند.

قبل از رسم هر منحنی لازم است مقیاس محورها را انتخاب کرد. همیشه محور افقی نشان‌دهنده‌ی متغیر مستقل است. اگر بیش از یک متغیر وابسته داشته باشیم، بهتر است که نمایش تغییرات این دو یا چند متغیر وابسته را بر حسب یک متغیر مستقل روی یک صفحه رسم نماییم. مقیاس‌ها باید طوری انتخاب شود که خواندن منحنی آسان باشد و با دقت مقادیر به‌دست آمده تطبیق کند. به‌طور مثال اگر درجه حرارت با وسیله‌ای که دقت آن یک درجه است اندازه‌گیری شود لازم است که کوچکترین تقسیم‌بندی محورها از یک درجه کمتر نباشد. اعدادی که برای مدرج کردن محورها به‌کار می‌روند باید به‌صورت ۲، ۵، ۱۰، ۲۰، ۵۰، ۱۰۰ و غیره باشد. بعضی مواقع ضریب ۴ ممکن است مورد استفاده قرار گیرد اما ۳، ۶ و ۷ هرگز به‌کار نمی‌رود. تعداد این اعداد نباید کمتر از ۴ و بیشتر از ۱۰ باشد.

مقیاس‌ها را نباید مثلاً (kgf x ۱۰۰) علامت‌گذاری کرد زیرا معلوم نیست آیا منظور این است که هر واحد روی محور صد کیلوگرم است یا یکصدم کیلوگرم. در بعضی مواقع بهتراست که منحنی را از پهلو در گزارش قرار دهیم، در این‌صورت اگر گزارش انگلیسی است با گرداندن ۹۰درجه در جهت عقربه‌های ساعت و اگر گزارش فارسی است با چرخاندن ۹۰درجه در خلاف جهت عقربه‌های ساعت، منحنی باید قابل خواندن باشد. در بعضی از منحنی‌ها مانند منحنی‌های مربوط به راندمان که به‌طور عادی یک نقطه‌ی صفر دارند، بهتر است که برای کنترل، منحنی را با خط چین امتداد داد تا مشاهده شود که از صفر می‌گذرد یا نه. نقاط منفردی که در منحنی‌ها وجود دارند به دقت باید بررسی شود. توابعی که امکان دارد منحنی نمایش آن‌ها در مقیاس لگاریتمی به صورت خط درآیند باید روی کاغذ لگاریتمی رسم شوند. هرگاه لازم باشد که دو یا چند منحنی برای مقایسه روی یک صفحه رسم شود بهتر است با به‌کار بردن نشان‌هایی مانند دایره و مثلث نقاط آزمایش هر یک از منحنی‌ها را مشخص نمائیم و یا اینکه یکی را با خط پر و دیگری را خط-چین رسم نماییم. مطالب فوق را می‌توان در زیر به‌طور خلاصه بیان کرد.

۱- توابع روی محور عمودی و متغیرهای مستقل روی محور افقی نشان داده شوند.

۲- مقیاس‌ها باید ساده باشد به‌طوریکه نقاط آزمایشی با کمی تجسس خوانده شود.

۳- نقاط به دست آمده از آزمایش باید به وسیله‌ی علامت‌های O ، x ، □ و Δ روی منحنی مشخص گردند.

۴- باید از رسم منحنی‌هایی که مربوط به هم نیستند در روی یک ورقه خودداری کرد اما بیشتر مواقع برای مقایسه چند منحنی مبادرت به این کار لازم است. در این مواقع منحنی‌ها باید به آسانی از هم تشخیص داده‌شوند.

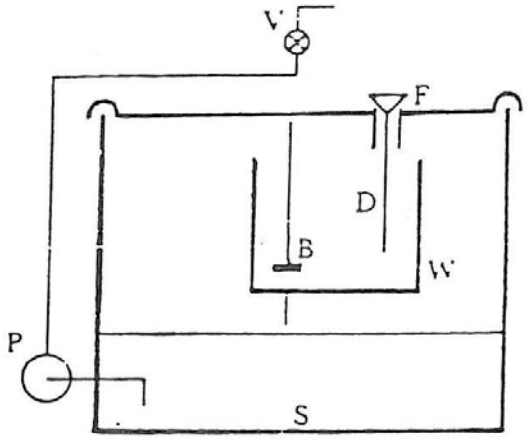
۵- تمام منحنی‌ها و محورها باید به وسیله عناوین آن‌ها مشخص شوند.

میز هیدرولیکی

میز هیدرولیکی وسیله‌ای است که در آزمایشگاه سیالات به طور گسترده در اغلب آزمایش‌ها به‌کار می‌رود. شکل ۱ شمای کلی این میز را نشان می‌دهد.

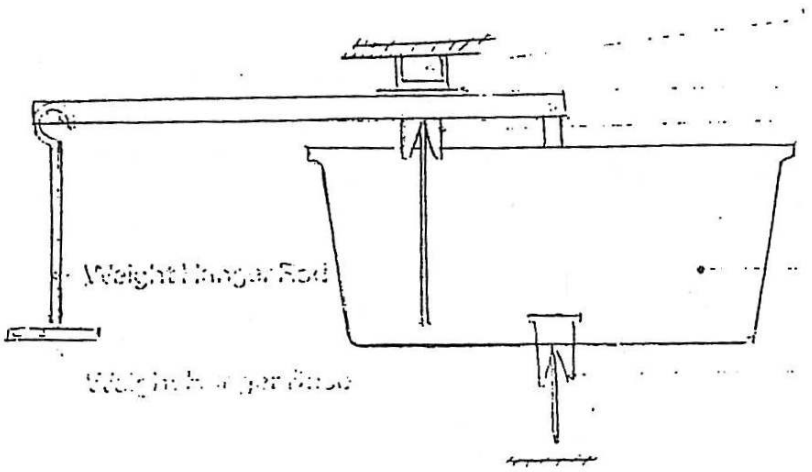
شکل (۱) شمای کلی میز هیدرولیکی

این میز شامل منبع اصلی آب، پمپ، شیر کنترل و تانک اندازه‌گیری دبی است. شکل ۲ مقطع این میز را با اجزاء مختلف آن نشان می‌دهد.



شکل (۲) مقطع میز هیدرولیکی

میز هیدرولیکی علاوه بر تامین آب مورد نیاز هر وسیله‌ی آزمایش، دارای تانک مخصوص برای اندازه‌گیری دبی وزنی سیال است. شکل۲ اجزای مختلف تانک اندازه‌گیری دبی را نشان می‌دهد.



شکل (۳) اجزاء تانک اندازه گیری دبی

همان‌گونه که در شکل ۳ دیده می‌شود تانک اندازه‌گیری دبی شامل: مخزن اندازه‌گیری، شیر تخلیه و سیستم ترازو است. ترازو شامل تکیه‌گاه، بازوی ترازو با نسبت سه به یک و کفه‌ی مربوط به وزنه‌ها است. برای اندازه‌گیری دبی به کمک تانک اندازه‌گیری دبی مراحل زیر را باید انجام‌داد:

۱- در ابتدا چون شیر تخلیه باز است آبی در مخزن ذخیره نمی‌شود و چون اهرم مربوط به، بکاراندازی ترازو در وضعیت بالا قرار دارد قسمت مخزن نسبت به تکیه‌گاه در وضعیت بالا قرار می‌گیرد. پس از این‌که اهرم را به سمت پایین چرخاندیم شیر تخلیه بسته می‌شود و آب در داخل مخزن اندازه‌گیری جمع می‌شود. در ابتدای این مرحله وزن کفه بیشتر از وزن مخزن است، بنابراین قسمت کفه نسبت به تکیه‌گاه پایین‌تر قرار می‌گیرد.

۲- درحالی‌که آب در مخزن اندازه‌گیری در حال جمع شدن است، لحظه‌ای فرا می‌رسد که وزن مجموعه مخزن اندازه‌گیری و آب داخل آن با وزن کفه به حالت تعادل می‌رسد و بازوی رابط بالا آمده و در وضعیت افقی قرار می‌گیرد. درست در لحظه‌ی مشاهده‌ی این وضعیت باید کرنومتر اندازه‌گیری زمان را به‌کار انداخت.

۳- پس از شروع به‌کار کرنومتر وزنه‌ای را بر روی کفه‌ی ترازو قرار می‌دهیم که در نتیجه وزن کفه سنگین‌تر شده و به پایین می‌رود و البته آب نیز در حال جمع شدن در مخزن اندازه‌گیری است.

۴- مجدداً در لحظه‌ای که آب جمع‌شده در مخزن اندازه‌گیری، با وزن کفه و وزنه‌ی روی آن به تعادل رسیدند، میله‌ی رابط بالا آمده و در وضعیت افقی قرار می‌گیرد که در لحظه بالاآمدن باید کرنومتر را قطع کرد و زمان را ثبت نمود.

به این ترتیب مراحل مختلف اندازه‌گیری دبی پایان می‌پذیرد و باید اهرم را به سمت بالا چرخاند تا آب جمع‌شده در مخزن اندازه‌گیری تخلیه شود و مخزن برای اندازه‌گیری بعدی آماده شود.

چند تذکر

۱- قبل از شروع آزمایش باید مطمئن شوید که سطح آب در داخل منبع اصلی حداقل ۳۰ سانتی‌متر بالاتر از مکش پمپ قرار داشته باشد.

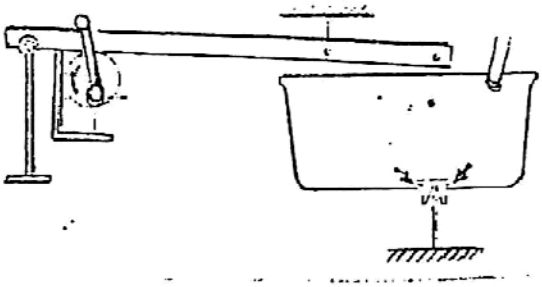
۲- در تمام زمان‌هایی که اندازه‌گیری دبی انجام نمی‌دهید، اهرم مربوط به اندازه‌گیری دبی در وضعیت بالا باشد تا آبی در مخزن اندازه‌گیری جمع نشود.

۳- پس از هر مرحله‌ی اندازه‌گیری وزنه‌ها را از روی کفه حتماً بردارید.

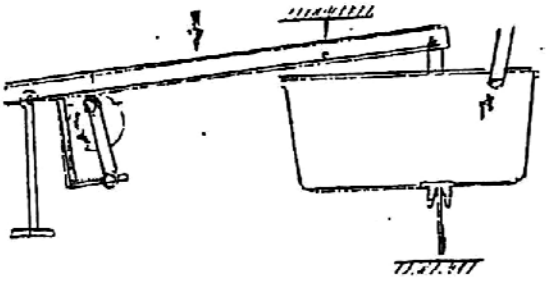
۴- در صورت وجود نشت آب، آن را برطرف کنید.

۵- در صورت ریزش آب بر روی پمپ، دستگاه را خاموش کرده، برق را قطع کنید و نشت و ریزش آب را برطرف سازید.

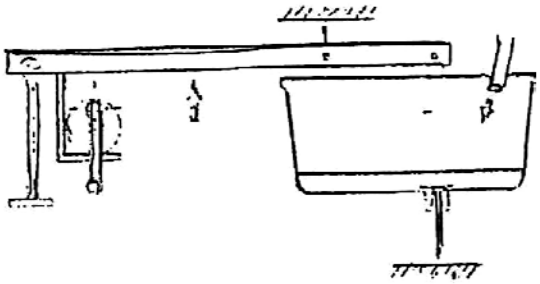
۶- فاصله زمانی یک دقیقه معمولاً زمان مناسبی برای اندازه‌گیری است بنابراین با سعی و خطا وزنه‌های مناسب را برای مراحل مختلف آزمایش انتخاب کنید.



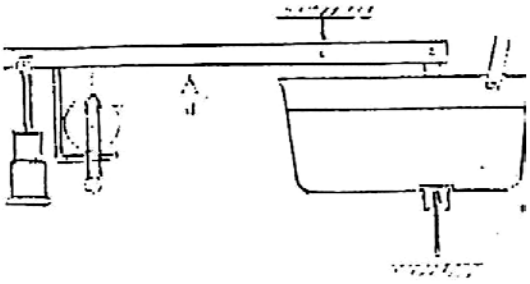
الف) موقعیت اهرم برای تخلیه مخزن



ب) موقعیت اهرم برای عملیات توزین



ج) شروع زمان‌سنجی و اضافه نمودن وزنه‌ها وقتی بازو در وضعیت افقی قرار گیرد



د) متوقف نمودن کرنومتر زمانی که بازو مجدداً به حالت افقی باز می‌گردد

آزمایش اول: آزمایش افت اصطکاک در سیستم‌های لوله‌کشی

هدف

در این آزمایش هدف اندازه‌گیری افت اصطکاک در لوله و اتصالات سیستم‌های لوله‌کشی است.

مقدمه

یکی از مسائل مهم متداول در مکانیک سیالات ارزیابی افت فشار است. در این دستگاه افت فشار در سیستم و اجزاء مختلف به‌کاررفته در لوله‌کشی حرارت مرکزی و تهویه مطبوع را می‌توان اندازه‌گیری کرد و از روی آن برآورد کلی ازمیزان تلفات انرژی را به دست آورد.

تئوری

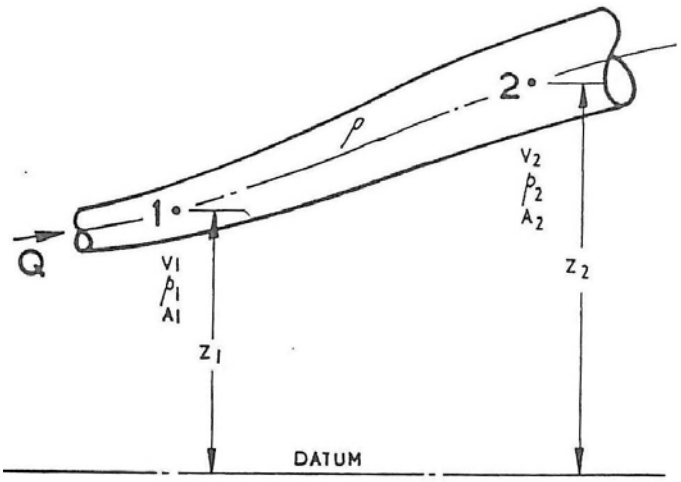
در هنگام جریان سیال غیرقابل تراکم در یک لوله‌ی جریان، مطابق شکل ۱، معادلات زیر حاکم هستند.

معادله‌ی پیوستگی (۱)

$$Q = A_1 V_1 = A_2 V_2$$

معادله‌ی برنولی (۲)

$$\frac{P_1}{\rho g} + \frac{V_1^2}{2g} + z_1 = \frac{P_2}{\rho g} + \frac{V_2^2}{2g} + z_2 + h_{L_{1-2}}$$



شکل (۱) یک لوله‌ی جریان

که در معادلات فوق

Q دبی حجمی برحسب (m^3/s)

V سرعت متوسط (m/s)

A سطح مقطع (m^2)

z ارتفاع از سطح مبنا (m)

P فشار استاتیک (N/m^2)

h_L افت هد (m)

ρ دانسیته (kg/m^3)

g شتاب جاذبه $(۹.۸۱ m/s^2)$

افت هد

افت هد در یک مدار لوله‌کشی ازدو قسمت تشکیل می‌شود:

الف) افت ناشی از مقاومت سیال در کل لوله‌های مدار

ب) افت موضعی ناشی از اجزایی چون شیرها، تغییر مقطع‌های ناگهانی، خم‌ها و ....

افت کلی، ترکیبی از دو گروه فوق است. به علت تداخل دو قطعه مجاور معمولاً افت مجموع دریک سیکل پیچیده با مقدار مجموع افت‌های اجزاء متفاوت است.

افت هد در یک لوله مستقیم

افت هددر طول مستقیم (L)لوله‌ای به قطر ثابت (d) از رابطه‌ی زیر به دست می‌آید.

$$h_L = \frac{۴fLV^۲}{۲gd} \quad (۳)$$

f ضریب اصطکاک است که تابع عدد رینولدز و زبری سطح داخلی لوله است و از جدول مودی استخراج می‌شود.

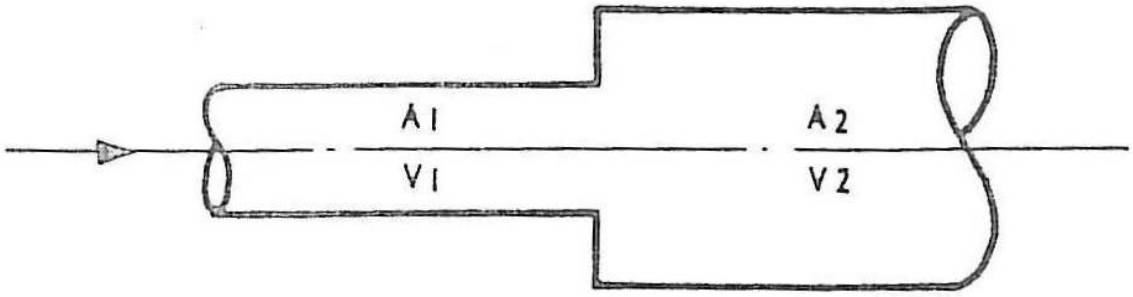
گفتنی است که در شبکه‌های لوله‌کشی همواره جریان از نوع مغشوش است.

افت هد ناشی از تغییر ناگهانی سطح مقطع

۱- انبساط ناگهانی

در انبساط ناگهانی همان‌گونه که در شکل ۲ نشان داده شده‌است سطح مقطع به طور ناگهانی افزایش می‌یابد و افت هد از رابطه‌ی زیر به دست می‌آید.

$$h_L = \frac{(V_۱ - V_۲)^۲}{۲g} \quad (۴)$$

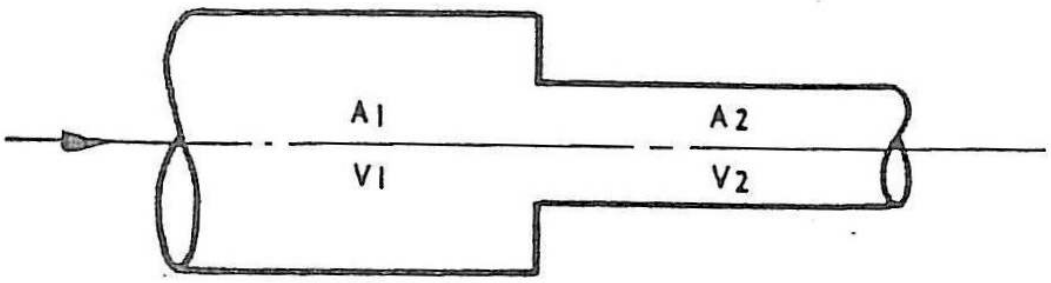


شکل (۲) انبساط ناگهانی

۲-تراکم ناگهانی

یک تراکم ناگهانی در شکل ۳نشان داده شده‌است و افت هد به صورت زیر به دست می‌آید.

$$h_L = K\frac{V_۱^۲}{۲g} \quad (۵)$$



جدول (۳) تراکم ناگهانی

در رابطه‌ی بالا K ضریب افت است که تابع نسبت سطح است و مقادیر آن در جدول ۱ آمده‌است. که این جدول را در اغلب کتاب‌های مکانیک سیالات می‌توان یافت.

	۰	۰,۱	۰,۲	۰,۳	۰,۴	۰,۵	۰,۶	۰,۷	۰,۸	۰,۹	۱,۰
	۰,۵	۰,۴۶	۰,۴۱	۰,۳۹	۰,۳۶	۰,۳۳	۰,۲۸	۰,۲۲	۰,۱۵	۰,۰۶	۰

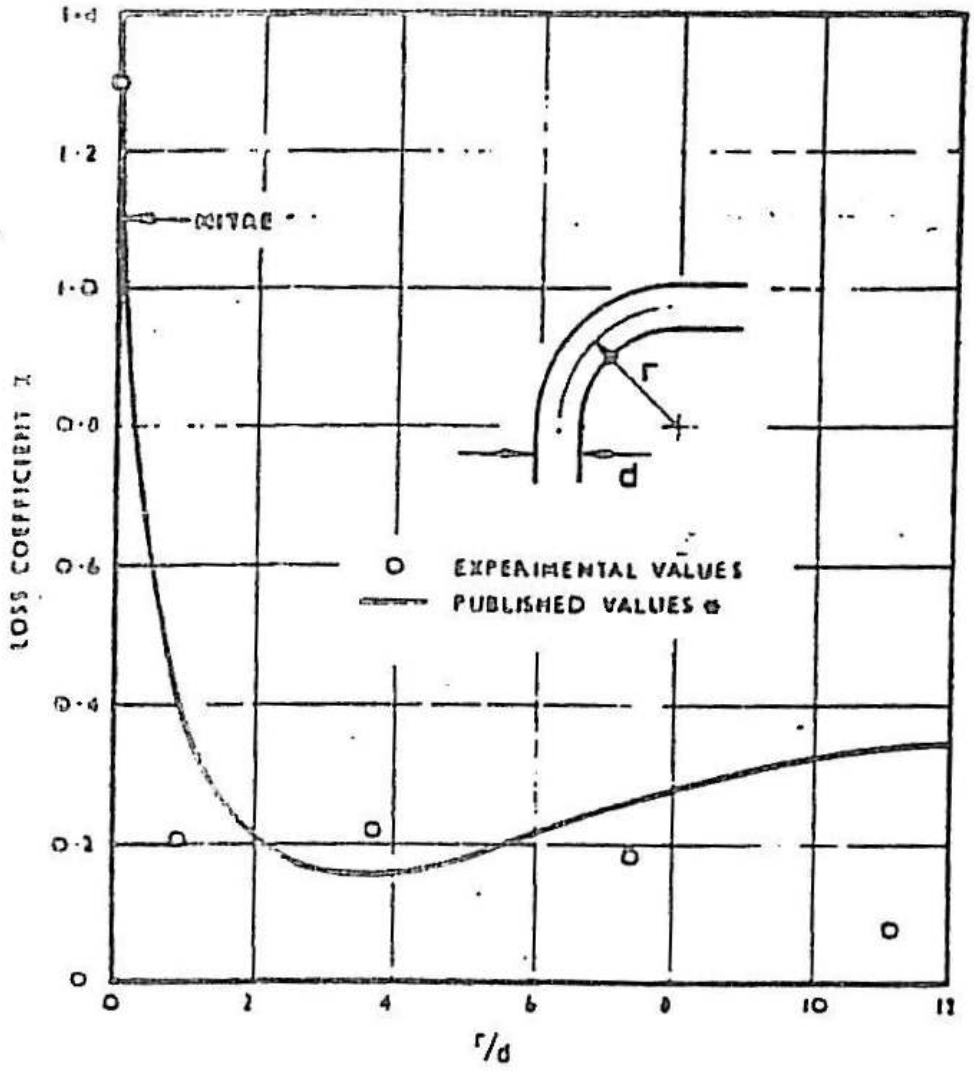
جدول (۱) ضریب K در انقباض ناگهانی

افت هد در خم‌ها

افت هد در یک خم از رابطه‌ی زیر به دست می‌آید.

$$h_L = K\frac{V^2}{2g} \qquad (۶)$$

که در آن Kضریب افت است که تابع نسبت شعاع خم به شعاع لوله و زاویه‌ی خم است. مقادیر K برای یک خم ۹۰درجه در شکل ۴ نشان داده شده‌است. گفتنی است که افت هد محاسبه شده از رابطه‌ی بالا، افت کل یک خم نیست و به این مقدار باید افت طول لوله‌ی معادل خم را نیز اضافه کرد.



شکل (۴) ضریب K برای یک خم ۹۰درجه

افت هد شیرها

افت هد یک شیر از رابطه‌ی زیر به دست می‌آید.

$$h_L = K\frac{V^2}{2g} \quad (۷)$$

که Kضریبی است که تابع نوع شیر و میزان بازبودن آن است که مقادیر آن در جدول ۲ آمده است.

نوع شیر	ضریب K
شیر فلکه تمام باز	۱۰,۰
شیر کشویی تمام باز	۰,۲
شیر کشویی نیم باز	۵,۶

جدول (۲) ضریب افت شیرها

شرح دستگاه

دستگاه آزمایش که در شکل ۵ نشان داده شده‌است، از دو مدار هیدرولیکی مختلف تشکیل شده‌است که در هر مدار اجزاء مختلفی وجود دارند. هر دو مدار از یک میز هیدرولیکی مشابه تغذیه می‌شوند. اجزاء موجود در دو مدار که یکی به رنگ آبی کم‌رنگ و دیگری آبی پررنگ است به شرح زیر است.

الف) مدار آبی پررنگ شامل:

۱- لوله مستقیم

۲- زانویی ۹۰ درجه تند

۳- زانویی ۹۰ درجه استاندارد

۴- شیر کشویی

ب) مدار آبی کم‌رنگ شامل:

۱- انبساط ناگهانی

۲- تراکم ناگهانی

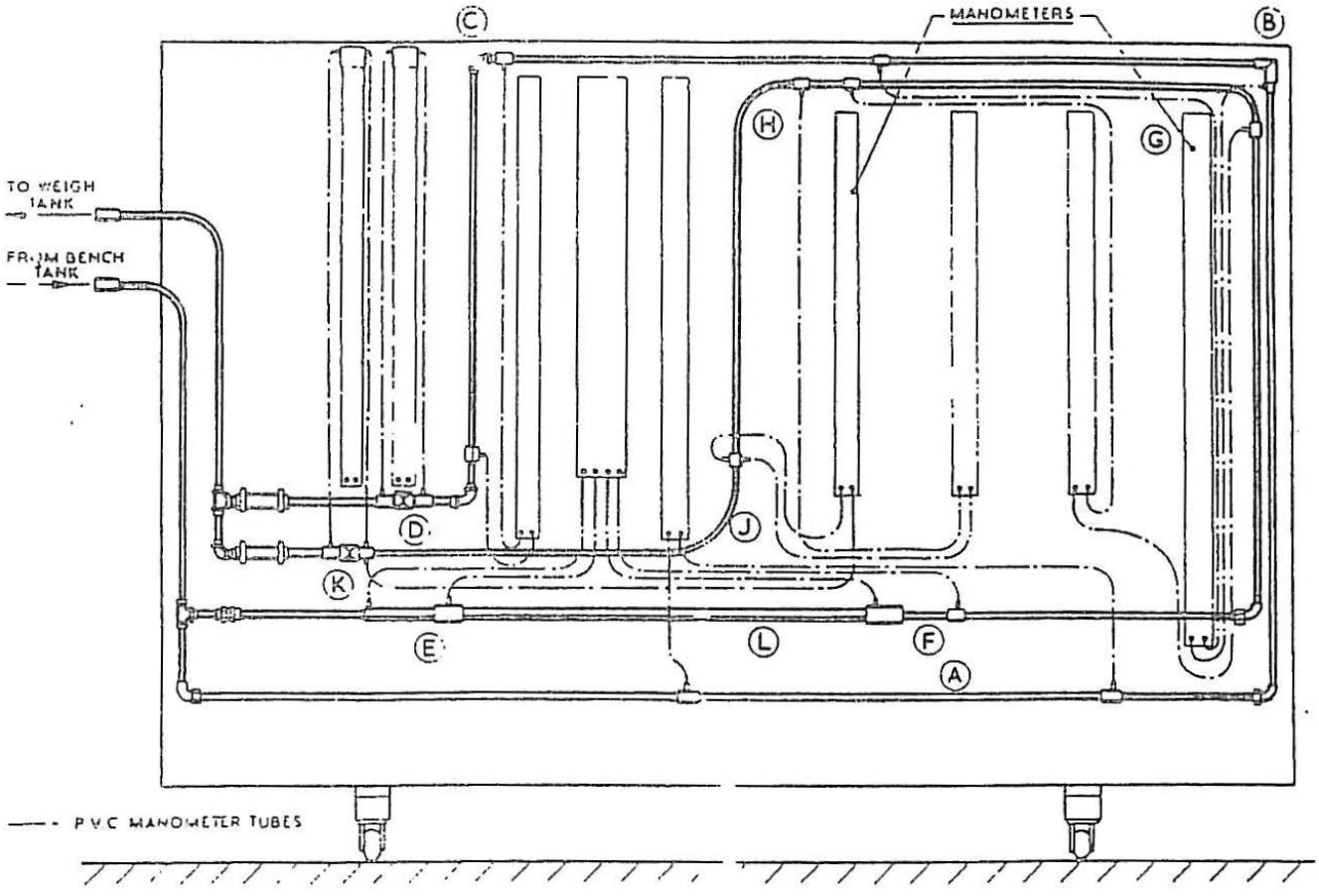
۳- خم ۹۰ درجه با شعاع انحنا ۵۰ میلیمتر

۴- خم ۹۰ درجه با شعاع انحنا ۱۰۰ میلیمتر

۵- خم ۹۰ درجه با شعاع انحنا ۱۵۰ میلیمتر

۶- شیر فلکه

در هر دو مدار ذکر شده‌ی بالا غیر از شیرها که به مانومترهای جیوه‌ای متصل هستند افت بقیه‌ی وسایل توسط مانومترهای آبی اندازه‌گیری می‌شوند. در شیرها از لوله‌های U شکلی که حاوی جیوه هستند استفاده شده و بالای جیوه را نیز آب پر می‌کند در حالیکه در مانومترهای آبی بالای ستون‌های آب هوا حبس می‌شوند.



شکل (۵) مدارهای لوله‌کشی و اتصالات مربوطه

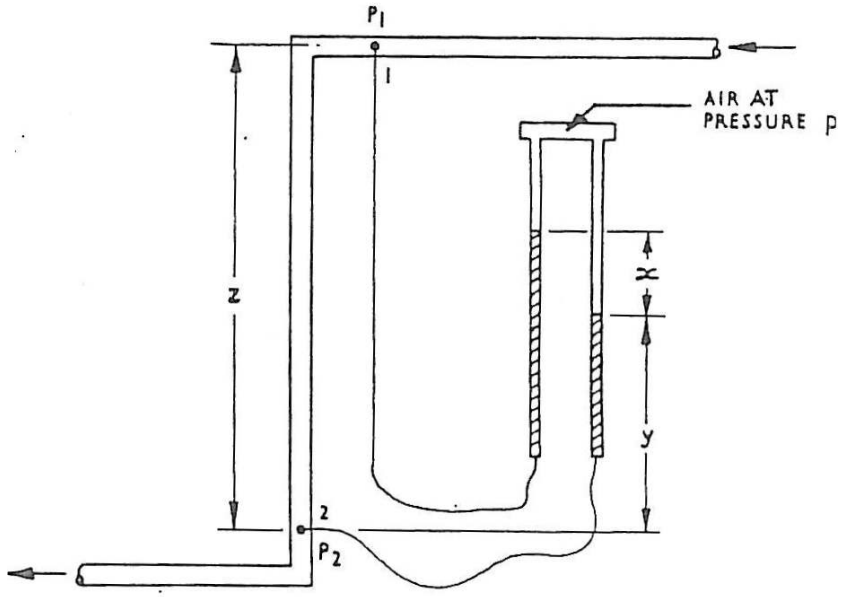
در جدول زیر اطلاعات مربوط به اجزاء مختلف در مدارهای لوله‌کشی آمده‌است.

نوع وسیله	مشخصات هندسی	مانومترهای متصل به آن
زانویی ۹۰ درجه استاندارد	—	۱ و ۲
لوله مستقیم	به قطر ۱۳/۶ میلیمتر و طول ۰/۹۱۴ متر	۳ و ۴
زانویی ۹۰ درجه تند	—	۵ و ۶
انبساط ناگهانی	از قطر ۱۳/۶ به قطر۲۶/۲	۷ و ۸
تراکم ناگهانی	از قطر ۲۶/۲به قطر ۱۳/۶	۹ و ۱۰
خم با شعاع ۱۵۰	—	۱۱ و ۱۲
خم با شعاع ۱۰۰	—	۱۳ و ۱۴
خم با شعاع ۵۰	—	۱۵ و ۱۶

در بالا به مانومترهای آبی و جیوه‌ای اشاره شد در اینجا بد نیست که اشاره‌ای کنیم به نحوه‌ی اندازه‌گیری افت هد توسط مانومتر آبی و جیوه‌ای.

الف) مانومتر آبی

شکل ۶ را درنظر بگیرید که در آن مانومتر آبی افت هد را بین ورودی و خروجی یک زانویی اندازه‌گیری می‌کند.



شکل (۶) اندازه‌گیری افت هد با مانومتر آبی

با نوشتن معادله‌ی برنولی بین مقاطع ۱ و ۲ داریم:

$$\frac{P_1}{\rho g}+\frac{V_1^2}{2g}+z=\frac{P_2}{\rho g}+\frac{V_2^2}{2g}+h_L \quad (۸)$$

چون $V_1=V_2$ است رابطه به صورت زیر ساده می‌شود.

$$h_L=z+\frac{P_1-P_2}{\rho g} \quad (۹)$$

حال لوله‌های مانومتر را درنظر می‌گیریم که در بالای آن هوا حبس شده‌است.

برای ستون سمت چپ $P=P_1+\rho g[z-(x+y)]$

برای ستون سمت راست $P=P_2-\rho g y$

که از ترکیب دو رابطه‌ی آخر نتیجه می‌شود:

$$x=z+\frac{P_1-P_2}{\rho g}$$

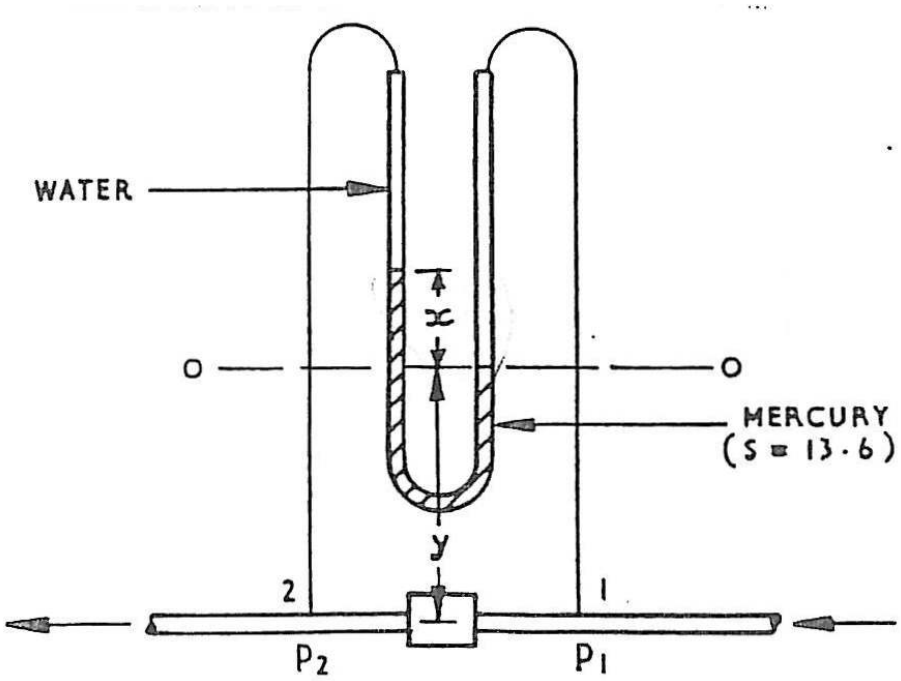
باجایگزینی این رابطه در معادله‌ی ساده شده‌ی برنولی که در بالا آمد خواهیم داشت:

$$h_L=x \quad (۱۰)$$

یعنی افت هد برابر اختلاف ارتفاع دو سطح مانومتر است.

ب) مانومتر U شکل جیوه‌ای

شکل ۷ را درنظر بگیرید که افت را به کمک یک مانومتر U شکل جیوه‌ای برای یک شیر اندازه‌گیری می‌کند.



شکل (۷) اندازه‌گیری افت با مانومتر جیوه‌ای

مجدداً معادله‌ی برنولی را بین مقاطع ۱ و ۲ می‌نویسیم و چون سرعت و ارتفاع یکسان است، افت به صورت زیر می‌شود.

$$h_L = \frac{P_۱ - P_۲}{\rho_{H_۲O} g}$$

حال لوله‌ی U شکل را درنظر بگیرید. در این لوله در مقطع OO فشار هر دو طرف مساوی هستند پس:

$$P_۲ - \rho_{H_۲O} g(x + y) + \rho_{Hg} g x = P_۱ - \rho_{H_۲O} g y$$

که نتیجه می‌دهد:

$$P_۱ - P_۲ = x g\left(\rho_{Hg} - \rho_{H_۲O}\right)$$

بنابراین

$$\frac{P_۱ - P_۲}{\rho_{H_۲O} g} = x(s - ۱)$$

که در آن s چگالی نسبی جیوه و برابر ۱۳/۶ است. در نتیجه:

$$\frac{P_۱ - P_۲}{\rho_{H_۲O} g} = ۱۲/۶x$$

از مقایسه‌ی این رابطه و معادله افت نتیجه می‌شود که:

$$h_L = ۱۲/۶x$$

یعنی افت هد ۱۲/۶ برابر اختلاف ارتفاع دو سطح مانومتر است.

روش آزمایش

پمپ را روشن کنید و پس از بر قراری جریان شیر کنترل که بر روی میز هیدرولیکی قرار دارد را به طور کامل باز کنید.شیر فلکه را که بر روی مدار آبی کم‌رنگ نصب شده به طور کامل ببندید و شیر کشویی را به طور کامل باز کنید تا جریان در مدار آبی پررنگ برقرار شود. کلیه مانومترهای مربوط به این مدار و اختلاف فشار مانومتر جیوه ای را در جدول شماره ۴ ثبت کنید. سپس شیر کشویی را به تدریج ببندید و آزمایش را ۸ مرحله تکرار کنید. در هر مرحله زمان لازم برای جمع شدن ۱۵کیلوگرم آب در داخل تانک اندازه‌گیری را ثبت کنید.

در مرحله بعد شیر کشویی را به طور کامل ببندید و شیر فلکه را به طور کامل باز کنید تا جریان در مدار آبی کم‌رنگ برقرار شود و آزمایش را مانند مدارقبل در ۸ مرحله تکرار کنید و نتایج را در جدول شماره ۵ ثبت کنید. درجه حرارت آب را نیز اندازه‌گیری کنید.

شماره آزمایش	زمان لازم برای ذخیره ۱۵ کیلوگرم آب	مانومترهای آبی (سانتی متر آب)				مانومترهای جیوه‌ای (سانتیمتر جیوه)
۱		۱	۲	۳	۴	۵ ۶ شیر کشویی
۱ ... ۸						

جدول شماره (۴) نتایج مدار پررنگ

شماره آزمایش	زمان لازم برای ذخیره ۱۵ کیلوگرم آب	مانومترهای آبی (سانتی متر آب)						مانومترهای جیوه‌ای (سانتیمتر جیوه)
۱		۷ ۸	۹ ۱۰	۱۱ ۱۲	۱۳ ۱۴	۱۵ ۱۶	۱۷ ۱۸	شیر کشویی
۱ ... ۸								

جدول شماره (۵) نتایج مدار آبی کم‌رنگ

محاسبات

۱- منحنی تغییرات $\log h$ برحسب $\log Q$ را برای لوله‌ی مستقیم رسم کنید. این منحنی باید یک خط مستقیم باشد. شیب خط را به دست آورید. شیب خط مقدار متوسط n را در رابطه‌ی $h \approx Q^n$ که باید کمتر از ۲ باشد، چرا؟

۲- از روی نتایج آزمایش مقدار سرعت متوسط را به دست آورده و از روی آن عدد رینولدز را محاسبه کنید. سپس از روی افت لوله‌ی مستقیم ضریب اصطکاک f را از رابطه‌ی ($f = h_l \frac{۲gd}{۴LV^۲}$) به دست آورید و منحنی تغییرات f برحسب رینولدز را رسم کنید. این منحنی را با منحنی لوله صاف مقایسه کنید. در لوله صاف f از رابطه‌ی بلازیوس یعنی ($f = ۰.۰۷۸۵/Re^{۱/۴}$) به دست می‌آید.

۳- افزایش هد در انبساط ناگهانی را در دو حالت بدون افت و در حالتی که افت هد از رابطه‌ی $h_l = \frac{(V_۱ - V_۲)^۲}{۲g}$ به دست می‌آید، محاسبه کنید. افزایش هد درحالت بدون افت $h_۲ - h_۱ = \frac{(V_۱^۲ - V_۲^۲)}{۲g}$ و در حالت با افت برابر $h_۲ - h_۱ = \frac{(V_۱^۲ - V_۲^۲)}{۲g} - h_l$ است. منحنی تغییرات افزایش هد اندازه‌گیری شده را برحسب افزایش هد محاسبه شده رسم کنید.

۴- منحنی تغییرات کاهش هد اندازه‌گیری شده بر حسب کاهش هد محاسبه شده را در یک کاهش ناگهانی مقطع رسم کنید. کاهش هد محاسبه شده را در دو حالت بدون افت و با افت به صورت زیر حساب کنید.

در حالت بدون افت $$h_1 - h_2 = V_2^2 \left[1 - \left(\frac{d_2}{d_1}\right)^4\right] / 2g$$

در حالت با افت $$h_1 - h_2 = V_2^2 \left[1 - \left(\frac{d_2}{d_1}\right)^4\right] / 2g + h_l$$

۵- برای حالت دبی ماکزیمم ضریب K پنج نوع زانویی مختلف به کار رفته را به دست آورید.

$K \frac{V^2}{2g}$ = (افت لوله مستقیم یک خم) − (افت اندازه‌گیری شده)

۶- ضریب K شیرهای کشویی و فلکه را از رابطه‌ی $h_L = K \frac{V^2}{2g}$ به دست آورید و منحنی تغییرات K برحسب دبی جریان رسم کنید.

آزمایش دوم:آزمایش پمپ گریز از مرکز

هدف

هدف از انجام این آزمایش بررسی نحوه‌ی کار یک پمپ گریز از مرکز و به دست آوردن منحنی‌های مشخصه آن است.

مقدمه

پمپ گریز از مرکز وسیله‌ای است که در آن انرژی مکانیکی به انرژی هیدرولیکی تبدیل شده ودر نتیجه، فشار و سرعت سیال افزایش می‌یابد. انرژی مکانیکی از طریق حرکت دورانی بخش دوار به سیال منتقل می‌شود.

تئوری

همان گونه که در بحث توربوماشین‌ها در درس سیالات گفته شد، پمپ‌ها کار را به سیال منتقل می‌کنند . معادله حاکم بر این انتقال انرژی که از طریق ممنتوم زاویه ای سیال به دست می‌آید به صورت زیر است.

$$W = T \cdot \omega = \rho Q[(r_2 V_{t2}) - (r_1 V_{t1})]\omega \qquad (1)$$

که در آن ρ دانسیته سیال ، Qدبی حجمی سیال ، V_{t1}مولفه مماسی سرعت مطلق در ورود به پروانه و V_{t2} مولفه مماسی سرعت در خروج از پروانه است r_1و r_2 نیز شعاع‌های دوران در ورود به پروانه و خروج از آن است .ω سرعت دوران، T مقدار کوپل و W مقدار کار انجام شده است.

رابطه ۱ را به صورت زیر می توان نوشت.

$$W = \rho Q(u_2 V_{t2} - u_1 V_{t1}) \qquad (1)$$

از طرفی پروانه پمپ کاری معادله $W = (\gamma Q.H)$ایجاد می‌کند که در آن H هد پمپ و γوزن مخصوص سیال است پس:

هد پمپ $H = \frac{u_2 V_{t2} - u_1 V_{t1}}{g}$ (۲)

از روی مثلث‌های سرعت ورودی و خروجی یک پمپ رابطه ۳ را به صورت زیر هم می‌توان نوشت.

$$H = \frac{V_2^2 - V_1^2}{2g} - \frac{W_2^2 - W_1^2}{2g} + \frac{u_2^2 - u_1^2}{2g} \quad (3)$$

که V سرعت مطلق، W سرعت نسبی و u سرعت خطی پره است.

شرح دستگاه

دستگاه آزمایش از یک مخزن اصلی که پر از آب است و پمپ گریز از مرکزی که بر روی آن نصب شده، تشکیل شده است. برروی لوله‌ی تخلیه‌ی پمپ یک عدد شیر کنترل و یک عدد فشارسنج برای اندازه‌گیری هد پمپ نصب شده است. برای اندازه‌گیری دبی پمپ از سرریز نصب‌شده بر روی کانال خروجی استفاده می‌شود. با استفاده از جعبه‌ی کنترل دور سرعت پمپ را می‌توان تغییر داد و با کمک دستگاه استربوسکوپ یا تاکومتر سرعت پمپ اندازه گرفته می‌شود. با اندازه‌گیری نیروی وارد بر نیروسنج جیوه‌ای و احتساب بازوی دینامومتر که ۱۶ سانتیمتر است کوپل قابل محاسبه است. توان الکتریکی ورودی به دستگاه را از روی ولت و آمپر نشان داده شده بر روی جعبه‌ی کنترل می‌توان محاسبه کرد.

روش آزمایش

شیر بعد از پمپ را ببندید و موتور را روشن کنید، پس از چند ثانیه شیر بعد از پمپ را تا آخر باز کنید تا جریان کامل برقرار شود. حال به کمک جعبه‌ی کنترل، دور را در ۱۰۰۰ دور در دقیقه (RPM) ثابت نگه دارید و به کمک شیر کنترل دبی را از ماکزیمم تا مینیمم در۸ مرحله کاهش دهید ودر هر مرحله اطلاعات خواسته شده را در جدول ۱ ثبت کنید. گفتنی است که در هر۸ مرحله دور همچنان باید در ۱۰۰۰ ثابت بماند.

آزمایش را در دور های ۱۵۰۰ و ۲۰۰۰ تکرار کنید و نتایج را در جدول‌های ۲ و۳ وارد کنید.

محاسبات

از روی نتایج آزمایش مقادیر کوپل دینامومتر $(T = F \cdot r)$، قدرت محوری $(B.H.P = T \cdot \omega)$، قدرت آبی $(W.H.P = \gamma QH)$و قدرت الکتریکی $(E.H.P = V \cdot I)$ را محاسبه کنید. سپس راندمان‌های محوری η_s، الکتریکی η_e و کل η_o را نیز محاسبه کرده و نتایج را در جدول‌های ۴،۵ و۶ درج کنید.

با استفاده از جدول‌های ۱ الی ۶ مطلوب است:

۱- رسم منحنی‌های تغییرات هد برحسب دبی در دورهای مختلف $(H - Q)$

۲- رسم منحنی‌های تغییرات$(\frac{H}{N^2})$ برحسب $(\frac{Q}{N})$ و مقایسه آن با منحنی‌های قبلی $(H - Q)$و نشان دهید که H با N^2و Qبا N متناسب است.

۳- رسم منحنی‌های تغییرات قدرت محوری $B.H.P$برحسب دبی Q در دورهای مختلف نشان دهید که قدرت محوری با N^3 متناسب است.

۴- رسم منحنی‌های راندمان محوری η_sبر حسب دبی Q در دورهای مختلف

۵- رسم منحنی‌های راندمان الکتریکی η_e بر حسب قدرت محوری $B.H.P$ در دورهای مختلف

۶- رسم منحنی‌های راندمان کلی η_o بر حسب قدرت محوری $B.H.P$ در دورهای مختلف

نمونه‌های منحنی‌های فوق در شکل های ۱ تا ۶ داده شده است.

سوالات تکمیلی

به منظور تعمیم اطلاعات خود در مورد پمپ‌های گریز از مرکز به سوالات تکمیلی زیر پاسخ دهید.

۱- قطر لوله مکش بزرگتر از قطر لوله رانش است، علت آن را توضیح دهید.

۲- پمپ با مکش مضاعف چگونه است و به چه منظوری ساخته می‌شود؟

۳- پمپ‌های چند طبقه چگونه اند و به چه منظوری ساخته می‌شوند؟

۴- تفاوت بین پمپ‌های سری و موازی را توضیح دهید.

۵- پیش از راه‌اندازی پمپ، شیر بعد از پمپ را باید بست، علت آن چیست؟

آمپر	ولت	دور موتور (ثابت)	نیروسنج (دینامومتر)	دبی	هد پمپ	مرحله
		۱۰۰۰				۱
		۱۰۰۰				...
		۱۰۰۰				۸

جدول شماره (۱) نتایج پمپ گریز از مرکز در دور ۱۰۰۰

آمپر	ولت	دور موتور (ثابت)	نیروسنج (دینامومتر)	دبی	هد پمپ	مرحله
		۱۵۰۰				۱
		۱۵۰۰				...
		۱۵۰۰				۸

جدول شماره (۲) نتایج پمپ گریز از مرکز در دور ۱۵۰۰

آمپر	ولت	دور موتور (ثابت)	نیروسنج (دینامومتر)	دبی	هد پمپ	مرحله
		۱۵۰۰				۱
		۱۵۰۰				...
		۱۵۰۰				۸

جدول شماره (۳) نتایج پمپ گریز از مرکز در دور ۲۰۰۰

مرحله	T	$B.H.P$	$W.H.P$	$E.H.P$	$\eta_s=\frac{W.H.P}{B.H.P}$	$\eta_e=\frac{B.H.P}{E.H.P}$	$\eta_o=\frac{W.H.P}{E.H.P}$	
۱								۱۰۰۰
...								۱۰۰۰
۸								۱۰۰۰

جدول شماره (۴) نتایج محاسبات دور ۱۰۰۰

مرحله	T	$B.H.P$	$W.H.P$	$E.H.P$	$\eta_s=\frac{W.H.P}{B.H.P}$	$\eta_e=\frac{B.H.P}{E.H.P}$	$\eta_o=\frac{W.H.P}{E.H.P}$	
۱								۱۵۰۰
...								۱۵۰۰
۸								۱۵۰۰

جدول شماره (۵) نتایج محاسبات دور ۱۵۰۰

مرحله	T	$B.H.P$	$W.H.P$	$E.H.P$	$\eta_s=\frac{W.H.P}{B.H.P}$	$\eta_e=\frac{B.H.P}{E.H.P}$	$\eta_o=\frac{W.H.P}{E.H.P}$	
۱								۲۰۰۰
...								۲۰۰۰
۸								۲۰۰۰

جدول شماره (۶) نتایج محاسبات دور ۲۰۰۰

آزمایش سوم: افت اصطکاک در لوله با جریان‌های آرام و مغشوش

هدف

هدف از انجام این آزمایش، بررسی جریان‌های آرام و مغشوش در یک لوله و اندازه‌گیری ضریب اصطکاک در جریان-های مربوطه است.

تئوری

به هنگام عبور سیال از داخل یک لوله، مقاومت اصطکاکی سیال باعث ایجاد افت در لوله می‌شود که مقدار این افت به نوع جریان سیال بستگی دارد.

جریان آرام

درجریان آرام، افت اصطکاک توسط رابطه‌ی زیر که به رابطه‌ی پویسیال معروف است، محاسبه می‌شود:

$$i = \frac{۳۲\mu}{\rho g D^{۲}}\mathrm{u}$$

به عبارتی افت با توان یکم سرعت متناسب است:

$$i = ku$$

جریان مغشوش

در جریان مغشوش، افت اصطکاک از معادله دارسی به صورت زیر محاسبه می‌شود:

$$i = \frac{۴f}{D} \times \frac{u^{۲}}{۲g}$$

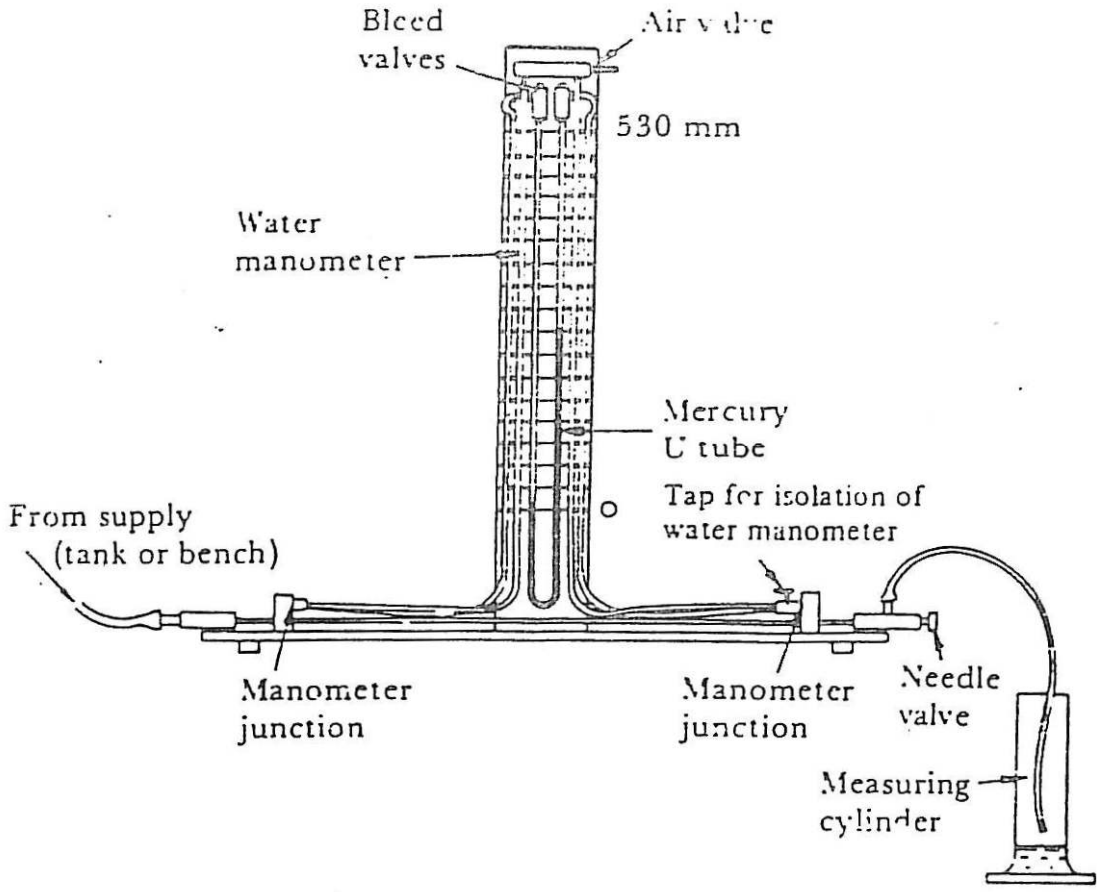
که در آن f ضریب اصطکاک نامیده می‌شود و تابعی از عدد رینولدز و زبری لوله است.در واقع در جریان مغشوش، افت با توان n ام سرعت متناسب است یعنی:

$$i \approx ku^{n}$$

و n عددی بین ۱/۷ تا۲ است ومقدار آن به عدد رینولدز و زبری لوله بستگی دارد.

شرح دستگاه

دستگاه آزمایش شامل لوله‌ای به قطر۳ میلیمتر و طول ۵۲۴ میلیمتر است که افت فشار در آن مورد بررسی قرار می‌گیرد. بر روی این لوله دو عدد پیزومتر برای اندازه‌گیری افت فشار نصب شده است. پیزومتر ورودی در فاصله‌ای که ۴۵ برابر قطر لوله از ورودی آن فاصله دارد نصب شده است و فاصله پیزومتر خروجی از انتهای لوله نیز ۴۰ برابر قطر لوله است. در محل پیزومتر خروجی شیر دوطرفه‌ای قرار دارد که در یک وضعیت به مانومتر آبی و در وضعیت دیگر به مانومتر جیوه‌ای متصل می‌شود. درانتهای لوله نیز شیر سوزنی برای تنظیم دبی جریان نصب شده است.در بالای مانومترها هم مخزن هوایی وجود دارد که با تنظیم هوای موجود درآن، سطح مانومتر آبی را در حالت تعادل می‌توان تنظیم کرد.کل این مجموعه بر روی پایه‌ای فلزی نصب شده و بر روی میز هیدرولیکی قرار داده می‌شود. اگر آزمایش جریان مغشوش انجام می‌شود، خروجی پمپ را مستقیماً به ورودی لوله وصل کنید. در صورتی‌که آزمایش جریان آرام مدنظر باشد، خروجی پمپ را به مخزنی که ارتفاع ثابتی دارد وصل کرده و سپس از آن مخزن آب را به ورودی لوله وصل کنید. ارتفاع این مخزن حدود یک متر بالاتر از سطح میز هیدرولیکی است. لوله لاستیکی شفافی آب خروجی از دستگاه آزمایش را مجدداً به میز هیدرولیکی می‌ریزد که با استفاده از یک استوانه شیشه‌ای مدرج و کرنومتر، دبی حجمی جریان را می‌توان مستقیماً اندازه‌گیری کرد. مجموعه در شکل ۱ نشان داده شده است.



شکل (۱) مجموعه اندازه گیری افت در لوله مستقیم

روش آزمایش

الف) جریان آرام

ابتدا خروجی پمپ را به مخزن با ارتفاع ثابت وصل کنید و از آن مخزن جریان آب را توسط لوله‌ای به ورودی دستگاه وصل کنید. در این حالت به کمک شیر دو طرفه موجود در روی دستگاه، مانومتر آبی را در مدار قرار دهید. با تنظیم شیر خروجی میز هیدرولیکی جریان را طوری تنظیم کنیدکه آب از مخزن سر نرود. سپس شیر سوزنی را کمی باز کنید تا آب به داخل لوله جریان پیدا کند و سعی کنیدکلیه‌ی هوای موجود در لوله‌ها را تخلیه کنید. مخصوصاً لوله‌هایی که به مانومتر آبی متصل می‌شوند باید عاری از هوا باشند و فقط در بالای سطح مانومترها هوا باید حبس شود که با کم و زیاد کردن مقدار هوا، سطح مانومترها را بالا یا پایین ببرید. حال شیر سوزنی را ببندید و در این حالت سطح مانومترها در لوله

U وارونه باید یکسان باشد که در غیر این صورت، یا شیر کاملاً بسته نشده و یا هنوز هوایی در لوله‌ها وجود دارد که باید تخلیه شود.

حال شیر سوزنی را به طور کامل باز کنید تا اختلاف هدی در حدود ۴۰۰ میلیمتر ایجاد شود و سپس اختلاف هد و دبی جریان را به کمک استوانه‌ی مدرج اندازه‌گیری و در ستون‌های ۴،۲،۱ و ۵ جدول۱ ثبت کنید. در هنگام اندازه‌گیری دبی باید دقت کرد که اولاً خروجی لوله هرگز زیر سطح آب داخل استوانه مدرج قرار نگیرد و ثانیاً استوانه مدرج همواره پایین‌تر از دستگاه آزمایش باشد. آزمایش را در۸ مرحله تکرار کنید و نتایج را در جدول۱ ثبت کنید. دمای آب (θ) را نیز اندازه‌گیری کنید. با انجام محاسبات ستون‌های بعدی جدول را پر کنید.

ب) **جریان مغشوش**

در این حالت خروجی پمپ را مستقیماً به دستگاه آزمایش وصل کنید و مانومتر آبی را نیز از مدار خارج کرده و به جای آن از مانومتر جیوه‌ای استفاده کنید. در این حالت نیز باید کلیه‌ی لوله‌ها را هواگیری کرد و پس از قطع جریان، سطح جیوه در دو طرف باید یکسان باشد. پس از هواگیری با باز کردن کامل شیر سوزنی دبی ماکزیمم را برقرار کنید تا اختلاف مانومتری حدود ۲۰۰ میلیمترجیوه ایجاد شود و مانند قبل اندازه‌گیری‌های لازم را در۸ مرحله انجام دهید و نتایج را در جدول۲ یادداشت کنید. دمای آب را نیز مانند حالت قبل اندازه‌گیری کنید. چون هر۲۰ میلیمتر جیوه حدود ۲۵۲ میلیمتر آب است، بهتر است که یک یا دو اندازه‌گیری هم در محدوده‌ی ۲۰ تا ۳۰ میلیمتر جیوه انجام شود تا نشان داده شود که پایین‌ترین حد جریان مغشوش به بالاترین حد جریان آرام مربوط می‌شود. برای به دست آوردن i در جدول۱، Δh را بر l طول لوله تقسیم کنید و در جدول۲، Δh را در۱۲/۶ضرب و سپس بر l طول لوله تقسیم کنید.

محاسبات

۱- منحنی لگاریتمی تغییرات $\log i$ بر حسب $\log u$را برای هر دو مرحله‌ی آزمایش رسم کنید و بر روی آن بحث کنید.

۲- مقادیر f را برای هر دو حالت آزمایش محاسبه کنید، و آن‌ها را با $f = \frac{۶۴}{Re}$ برای جریان آرام و $f = \frac{۰/۰۷۹}{Re^{(۰/۲۵)}}$ برای جریان مغشوش، مقایسه کنید.

۳- با استفاده از دیاگرام Moody و نتایج آزمایش جریان مغشوش، زبری نسبی لوله را تعیین کنید.

۴- از روی نتایج جریان آرام لزجت دینامیکی سیال (μ) را حساب کنید.

۵- اگر در اندازه‌گیری طول لوله ۱میلیمتر خطا و در اندازه‌گیری قطر آن ۰/۰۳ میلیمتر خطا وجود داشته باشد، درصد خطا در محاسبه‌ی μ که در سوال ۴ ذکر شد، چه‌قدر است؟

۶- با استفاده از نتایج ترسیمی مقادیر رینولدز بحرانی را به‌دست آورید.

مراحل	$\log u$	$\log i$	θ	i	$h۱ - h۲$ (m)	$h۲$ (mm)	$h۱$ (mm)	u (m/s)	t (s)	Q (ml)
۱										
...										
۸										

جدول شماره (۱) نتایج جریان آرام

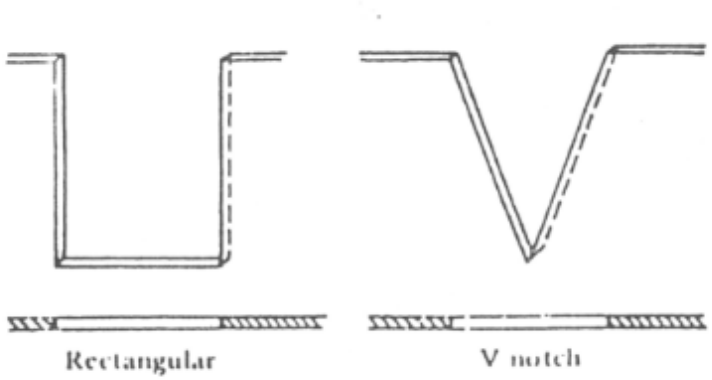
مراحل	$\log u$	$\log i$	θ	i	$h۱ - h۲$ (m)	$h۲$ (mm)	$h۱$ (mm)	u (m/s)	t (s)	Q (ml)
۱										
...										
۸										

جدول شماره (۲) نتایج جریان مغشوش

آزمایش چهارم: آزمایش سرریز

مقدمه

برای انتقال آب در طبیعت در اغلب موارد از کانال‌های باز استفاده می شود که رودخانه‌ها، نهرها و کانال‌های پیش-ساخته نمونه‌هایی از آن‌ها هستند. برای آگاهی از مقدار آب عبوری در داخل کانال‌های باز از وسیله‌های مختلفی استفاده می‌شود. یکی از وسیله‌ها سرریز است، سرریزها در واقع موانعی هستند که در مسیر جریان در داخل کانال قرار داده می-شوند و آب از روی آن‌ها عبور کرده و ریزش می‌کند به همین علت به آن‌ها سرریز می‌گویند. سرریزها دارای شکل‌های مختلفی هستند که به سرریزهای مثلثی، مربعی، مستطیلی و ذوزنقه‌ای می‌توان اشاره کرد. در این آزمایش از دو نوع سرریز مثلثی و مستطیلی استفاده کرده و هدف تعیین رابطه‌ای تجربی بین ارتفاع آب جمع‌شده در پشت سرریز (نسبت به لبه‌ی ریزش آن) با دبی آب عبوری از آن است. شکل ۱ نمونه‌ای از سرریز مستطیلی و مثلثی را نشان می‌دهد.

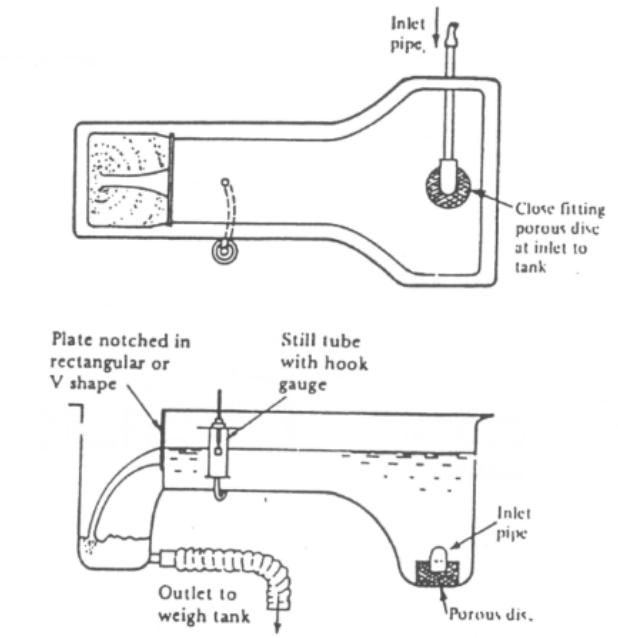


شکل (۱) سرریز مثلثی و مستطیلی

شرح دستگاه

شکل ۲ مجموعه یک سرریز را از دو نمای روبه‌رو و بالا نشان می‌دهد. همان‌گونه که ملاحظه می‌شود آب از طریق میز هیدرولیکی وارد محفظه‌ی آرامش می‌شود که در آن صفحه‌ی مشبکی قرار دارد و جریان را آرام می‌کند. سپس جریان وارد کانال بالادست شده و به سرریز می‌رسد. در قسمت کانال بالادست از وسیله‌ی اندازه‌گیری ارتفاع آب برای مشخص کردن ارتفاع سطح آب نسبت به کف کانال و یا لبه‌ی سرریز استفاده می‌شود. پس از کانال بالادست شیاری برای نصب سرریز تعبیه شده است که در داخل این شیار سرریز مثلثی و یا مستطیلی قابل نصب می‌باشد. جریان خروجی

از سرریز از طریق لوله خرطومی خروجی وارد مخزن اندازه‌گیری میز هیدرولیکی می‌شود که به کمک آن دبی جریان را می‌توان اندازه‌گیری کرد.



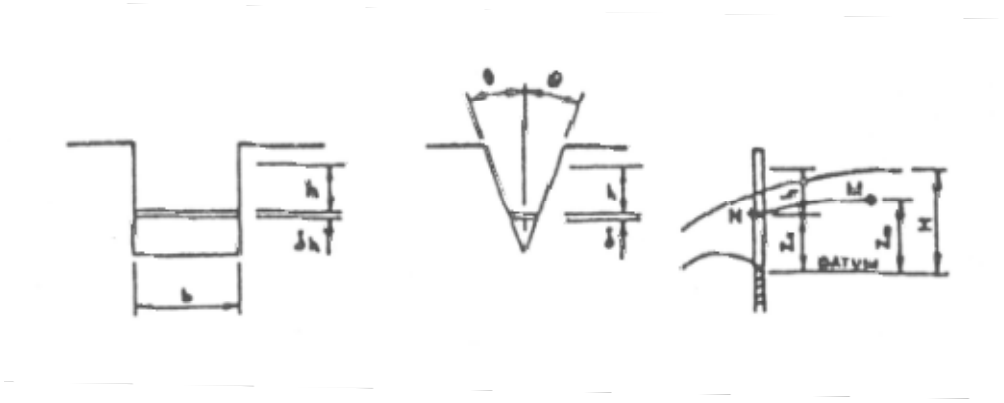
شکل (۲) مجموعه سرریز

تئوری

شکل۳ مشخصات جریان عبوری از روی یک سرریز را نشان می‌دهد. ذره متحرکی از سیال را در نظر بگیرید که از نقطه M واقع در بالادست سرریز حرکت کرده و به نقطه N در روی مقطع سرریز می‌رسد. اگر از افت انرژی صرفه‌نظر کنیم معادله برنولی را بین نقطه Mو N به صورت زیر می‌توان نوشت:

$$\frac{U_M^2}{2g} + \frac{P_M}{\gamma} + Z_M = Z_N + \frac{P_N}{\gamma} + \frac{U_N^2}{2g} \qquad (1)$$

در این معادله از تاثیر چسبندگی، اغتشاش، جریان‌های ثانویه و کشش سطحی صرفنظر شده و توزیع سرعت در بالادست سرریز یکنواخت فرض می‌شود. همچنین تمام ذرّات در هنگام عبور از سرریز به صورت افقی حرکت می‌کنند.



شکل (۳) شمایی از جریان سیال از روی سرریز

حال اگر سطح مقطع کانال بالادست بسیار بزرگتر از سطح مقطع سرریز باشد، سرعت در یک سطح عمودی واقع در موقعیت M بسیار کوچک‌تر از سرعت مشابه در مقطع N بوده و از $\frac{U_N^2}{2g}$ که بسیار کوچکتر از مقدار مربوطه در مقطع N است، می‌توان صرفنظر کرد یا به عبارتی آنرا در حالت سکون فرض کرد. با فرض فشار استاتیک در سطح سرریز برابر صفر یعنی $P_N = 0$داریم.

$$H = Z_N + \frac{U_N^2}{2g} \qquad (۲)$$

که H ارتفاع سطح آب بالادست نسبت به لبه‌ی ریزش سرریز است. ازطرفی داریم:

$$h = H - Z_N \qquad (۳)$$

که hاختلاف ارتفاع بین سطح آزاد بالادست و سطح آزاد آب در روی سطح سرریز است، پس:

$$h = \frac{U_N^2}{2g} \qquad (۴)$$

حال اگر المانی از سیال عبوری از سرریز به پهنای b را در نظر بگیریم ضخامت آن δh است. مقدار دبی عبوری از این المان برابر است با:

$$\delta Q = U_N b \delta h = \sqrt{2gh}\, b \delta h \qquad (۵)$$

دبی کل عبوری (Q) از انتگرال‌گیری δQاز صفر تا H به دست می‌آید. البته از بالا آمدن و تراکم سیال در سطح سرریز صرفنظر می‌کنیم.

پس $$Q = \int_{۰}^{H} \sqrt{۲gh}\, b d\delta$$

یا

$$Q = \frac{۲}{۳} H^{\frac{۳}{۲}} \sqrt{۲g}\, b \qquad (۶)$$

رابطه‌ی ۶ مقدار دبی عبوری ازیک سرریز مستطیلی شکل با عرض b را نشان می‌دهد. برای یک سرریز مثلثی با زاویه رأس ۲θ، عرض یک المان سیال برابر $۲(H-h)tan\,\theta$ می‌شود و از این رو مساحت المانی که ضخامت آن δh است $۲(H-h)tan\,\theta\delta h$می‌شود. در نتیجه مقدار دبی عبوری از المان سطح برابر است با:

$$\delta Q = U_N ۲(H-h)\tan\theta\delta h$$

یا

$$\delta Q = \sqrt{۲gh}\, ۲(H-h)tan\,\theta\delta h \qquad (۷)$$

که پس از انتگرال‌گیری داریم:

$$Q = \int_{۰}^{H} \sqrt{۲gh} \times ۲(H-h)tan\theta\, dh$$

$$Q = \frac{۸}{۱۵}\sqrt{۲g}\, tan\theta \times H^{\frac{۵}{۲}} \qquad (۸)$$

سیال عبوری از سرریز در هر دوجهت افقی و عمودی که با جداره ها در تماس است منقبض شده و در نتیجه سطح مقطع جریان کاهش می‌یابد. این انقباض شبیه انقباض سیال در عبور از یک نازل لبه‌تیز است و در هر حال باعث کاهش دبی عبوری می‌شود. بنابراین روابط ۶ و ۸ را به صورت زیر می‌نویسند.

سرریز مستطیلی

$$Q = C_d \frac{۲}{۳} \sqrt{۲g}\, bH^{\frac{۳}{۲}} \qquad (۹)$$

سرریز مثلثی

$$Q = C_d \frac{۸}{۱۵} \sqrt{۲g}\, tan\theta H^{\frac{۵}{۲}} \qquad (۱۰)$$

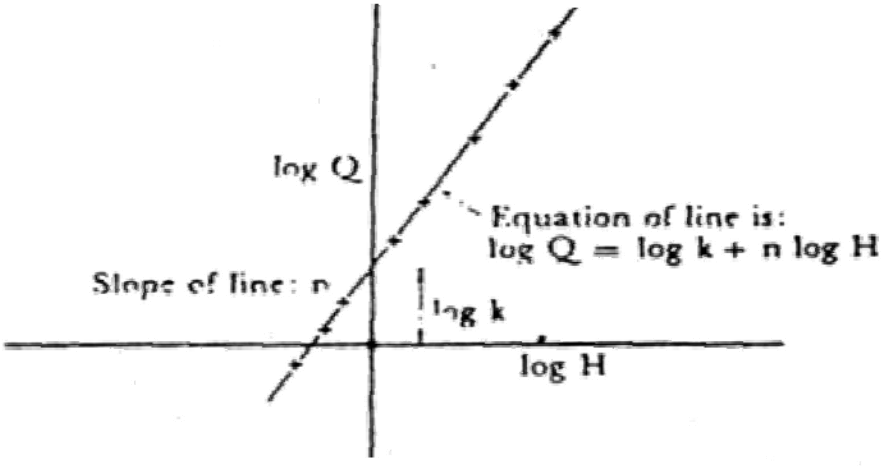
که C_d ضریب تخلیه سرریز است، الزاماً مستقل از H نیست و مقدار آن به صورت تجربی به دست می‌آید. هریک از روابط ۹ یا ۱۰ را به صورت رابطه کلی زیر می‌توان نوشت:

$$Q = kH^n \qquad (۱۱)$$

برای پیدا کردن n،k و همچنین C_dرابطه ۱۱ را به صورت زیر می‌نویسیم:

$$\log Q = \log k + n \log H$$

اگر نتایج حاصل از آزمایش را بر روی کاغذ لگاریتمی رسم کنیم به گونه‌ای که $\log H$ بر روی محور افقی و $\log Q$ برروی محور عمودی باشد و با این فرض که k و n در محدوده نتایج حاصل ثابت باشند، آنگاه منحنی حاصل به صورت یک خط راست خواهد بود که شیب آن برابر n است و عرض از مبدأ آن هم برابر $\log k$خواهد بود (شکل ۴ رابیندید.).

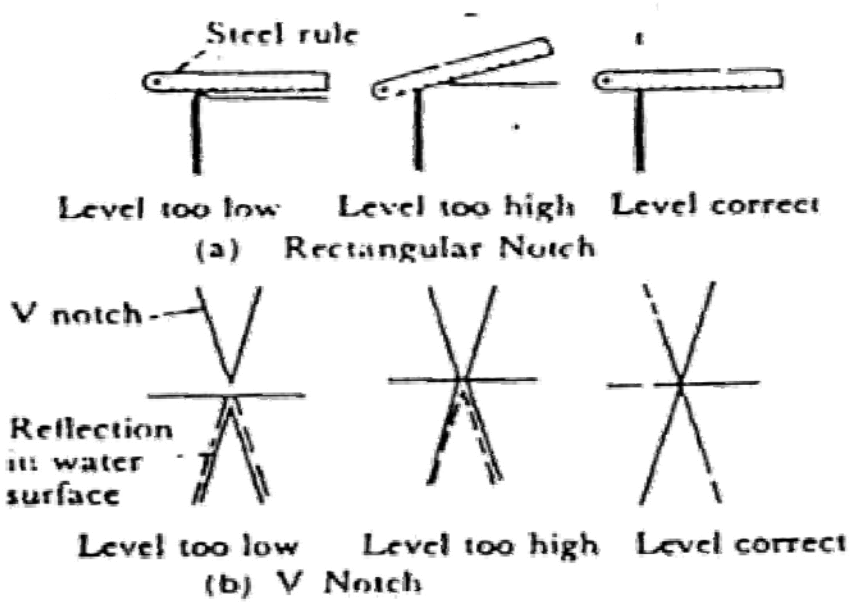


شکل (۴) منحنی لگاریتمی Q بر حسب H

روش آزمایش

پس از بستن شیر بعد از پمپ آنرا روشن کنید. بعد از چند ثانیه شیر را به آرامی باز کنید تا آب وارد مخزن آرامش سرریز شود و از آنجا به کانال بالادست سرریز راه یابد. پس از اینکه آب در پشت سرریز تا نزدیکی لبه آن بالا آمد شیر بعد از پمپ را ببندید و سرریز را کالیبره نمایید. نحوه کالیبره کردن به صورت زیر است:

به کمک شیر کنترل دبی سطح آب را درست تا لبه سرریز مماس نمایید که دراین لحظه تصویر لبه سرریز مستطیلی یا مثلثی و خود آن برهم منطبق می‌شوند. البته در مورد سرریز مستطیلی از یک خط‌کش نیز می‌توان استفاده نمود که در صورت مماس بودن لبه خط‌کش بر لبه سرریز و سطح آب، کالیبره شدن انجام شده است، شکل ۵ را ببینید.



شکل (۵) طرز کالیبره کردن سرریزها

تذکر ۱: برای کم یا زیاد کردن مقدار آب پشت سرریز می‌توان از پمپ و شیر بعد از آن نیز استفاده کرد و با باز و بسته و روشن و خاموش کردن پمپ مقدار آب پشت سرریز را می‌توان کم یا زیاد کرد. پس از تنظیم سطح آب، وسیله اندازه‌گیری ارتفاع آب را هم باید طوری تنظیم کرد که نوک سوزن آن مماس بر سطح آب باشد و خط‌کش ارتفاع

سطح هم بر روی صفر باشد. البته در صورتی که خط‌کش روی صفر تنظیم نشد ارتفاعی را که سرریز نشان می‌دهد به عنوان مبنا در نظر گرفته و در مراحل بعدی آزمایش ارتفاعات خوانده شده را نسبت به آن بسنجید.

پس از کالیبره شدن سرریز مورد استفاده و تنظیم خط‌کش، شیر را تا آخر باز کنید تا بیشترین دبی از سرریز عبور نماید و در این حالت ارتفاع آب را یادداشت نمایید. در این مرحله دبی آب را به کمک دستگاه تانک اندازه‌گیری دبی که قبلاً با روش کار آن آشنا شده‌اید، اندازه‌گیری کنید. با بستن تدریجی شیر بعد از پمپ و کاهش دبی آزمایش را برای هردو سرریز در ۸ مرحله تکرار کنید بدیهی است که در هر مرحله ضمن اندازه‌گیری دبی، ارتفاع آب پشت سرریز را هم اندازه گیری نمایید.

تذکر۲: اندازه‌گیری با سرریز باید تا مرحله‌ای ادامه یابد که آب حالت ریزش خود را از دست ندهد بنابراین در سرریز مستطیلی آخرین ارتفاع خوانده شده نباید کمتر از ۱۰ میلیمتر و در سرریز مثلثی هم کمتر از ۲۰میلیمتر نشود. باتوجه به این موضوع سعی کنید که در هر سرریز بین ارتفاع‌های ماکزیمم و مینیمم آزمایش‌ها را تا آنجایی که ممکن است در فواصلی مساوی انجام دهید.

نتایج و محاسبات

۱- جدولی مانند جدول زیر تهیه کنید و ضمن ثبت نتایج آزمایش در آن، با استفاده از روابط داده شده محاسبات مربوطه را انجام داده و جدول را پر کنید.

۲- منحنی تغییرات $Q(\mathrm{m}^3/\mathrm{s}) \times ۱۰^۴$ بر حسب $H(\mathrm{m})$را برای دو سرریز مستطیلی و مثلثی رسم کرده و ضمن مقایسه آن‌ها بر ویژگی‌های دو سرریز اشاره نمایید. بدین معنی که از چه سرریز باید در چه محدوده‌ای استفاده کرد.

۳- منحنی لگاریتمی سرریزها را بر روی کاغذ لگاریتمی رسم کرده و با استفاده از رابطه کلی $Q = kH^n$ضریب k و توان n را برای هر دو سرریز به دست آورید. مقادیرn به دست آمده را با ۱/۵ و ۲/۵ که توان H در معادلات ۹ و ۱۰ هستند مقایسه کنید.

۴- از روی ضرایب k به دست آمده و با استفاده از معادله‌های ۹ و ۱۰ ضریب تخلیه (C_d)دو سرریز مورد استفاده را محاسبه نمایید.

سوالات تکمیلی

۱- برای اندازه گیری دبی در کانال‌های باز، به غیر از سرریز که در این آزمایش با آن آشنا شدیم از چه وسایل و روش‌های دیگری استفاده می‌شود، آن‌ها را ذکر کنید.

۲- اگر شکل سرریز ذوزنقه‌ای باشد رابطه تئوریک دبی را برای آن به دست آورید.

۳- هرگونه پیشنهادی در خصوص انجام آزمایش، اطلاعات حاصل و ارائه نتایج و ... دارید، بنویسید.

مراحل آزمایش	اعداد خوانده شده با خط کش مندرج (mm)	H (mm)	W (kg)	t (s)	$Q \times ۱۰^۴$ ($m^۳/s$)	$\log Q$	$\log H$
۱							
...							
۸							

جدول (۱) نتایج سرریز مستطیلی

مراحل آزمایش	اعداد خوانده شده با خط کش مندرج (mm)	H (mm)	W (kg)	t (s)	$Q \times ۱۰^۴$ ($m^۳/s$)	$\log Q$	$\log H$
۱							
...							
۸							

جدول (۲) نتایج سرریز مثلثی

آزمایش پنجم :جریان عبوری از یک وانتوری

هدف

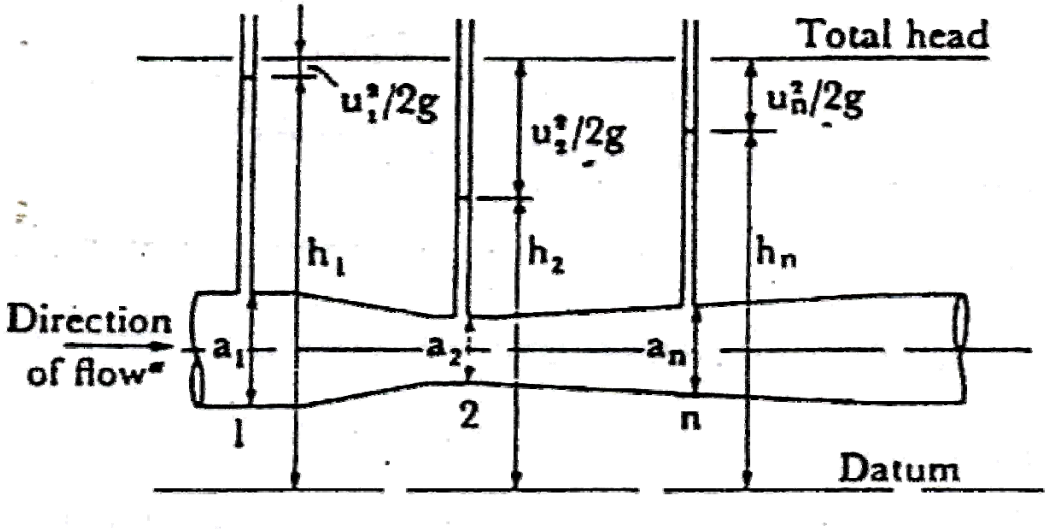
در این آزمایش دو هدف مختلف دنبال می‌شود:

۱- تعیین ضریب تخلیه‌ی (c) در یک وانتوری با مقایسه جریان اندازه‌گیری شده و جریان ایده‌آل عبوری از آن

۲- اندازه‌گیری توزیع فشار در طول یک وانتوری و مقایسه آن با توزیع فشار ایده‌آل

تئوری

لوله‌ی همگرا-واگرایی را مطابق شکل ۱ در نظر بگیرید که سیال غیر قابل تراکمی در مقطع (۱) به آن وارد می‌شود، مقطع (۲)گلوگاه و مقطع (h) هر مقطع اختیاری پس از گلوگاه است.



شکل (۱) جریان عبوری از داخل یک وانتوری

با صرفنظر از افت‌ها معادله‌ی برنولی را بین ورودی، گلوگاه و هر مقطع اختیاری به صورت زیر می‌توان نوشت:

$$\frac{u_1^2}{2g} + h_1 = \frac{u_2^2}{2g} + h_2 = \frac{u_n^2}{2g} + h_n \qquad (1)$$

معادله‌ی پیوستگی بین مقاطع فوق به صورت زیر است:

$$Q = u_1 a_1 = u_2 a_2 = u_n a_n \qquad (2)$$

از ترکیب معادله‌های (۱) و (۲) سرعت در گلوگاه به صورت زیر به دست‌می‌آید:

$$u_2 = \sqrt{\frac{2g(h_1 - h_2)}{1 - \left(\frac{a_2}{a_1}\right)^2}}$$

و مقدار دبی سیال به صورت زیر می‌شود:

$$Q = u_2 a_2 = a_2 \sqrt{\frac{2g(h_1 - h_2)}{1 - \left(\frac{a_2}{a_1}\right)^2}} \qquad (3)$$

که در روابط بالا a نشان‌دهنده‌ی سطح مقطع است.

معادله‌ی ۳ دبی ایده‌آل را مشخص می‌نماید. به علت وجود افت فشار در بین مقاطع و همچنین عدم یکنواختی مقاطع دبی واقعی کمتر از مقدار فوق است و باید ضریب تصحیح را در رابطه‌ی فوق وارد نمود که به آن ضریب تخلیه (C_d) می‌گویند.

$$Q_a = C_{d2} \sqrt{\frac{2g(h_1 - h_2)}{1 - \left(\frac{a_2}{a_1}\right)^2}} \qquad (4)$$

ضریب تخلیه‌ی (C_d) تابعی از دبی جریان بوده و مقدار آن برای دستگاه آزمایش بین ۰/۹۲ تا ۰/۹۹ تغییر می‌کند.

با بازنویسی معادله‌ی ۱ به صورت زیر، توزیع فشار ایده‌آل بین ورودی و هر مقطع دلخواه به دست می‌آید:

$$h_n - h_1 = \frac{u_1^2}{2g} - \frac{u_n^2}{2g}$$

با تقسیم طرفین رابطه‌ی فوق بر عبارت $\frac{u_۲^۲}{۲g}$ که هد جنبشی در گلوگاه وانتوری است معادله‌ی فوق به صورت زیر بی‌بعد می‌شود.

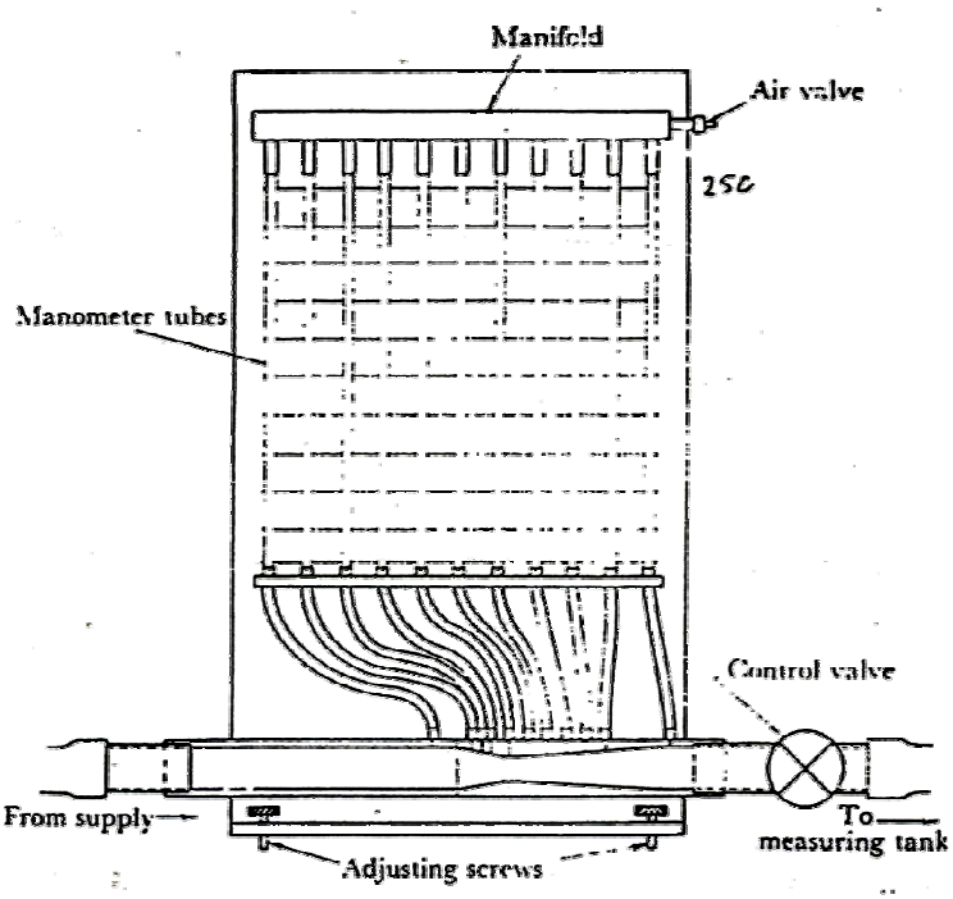
$$\frac{h_n - h_۱}{\frac{u_۲^۲}{۲g}} = \left(\frac{u_۲}{u_۱}\right)^۲ - \left(\frac{u_۲}{u_n}\right)^۲$$

با جایگذاری نسبت سطح‌ها به جای نسبت سرعت‌ها از معادله پیوستگی رابطه‌ی بالا بصورت زیر در می‌آیدکه توزیع فشار ایده‌آل در وانتوری را به تغییرات سطح مرتبط می‌کند.

$$\frac{h_n - h_۱}{\frac{u_۲^۲}{۲g}} = \left(\frac{a_۲}{a_۱}\right)^۲ - \left(\frac{a_۲}{a_n}\right)^۲ \quad (۵)$$

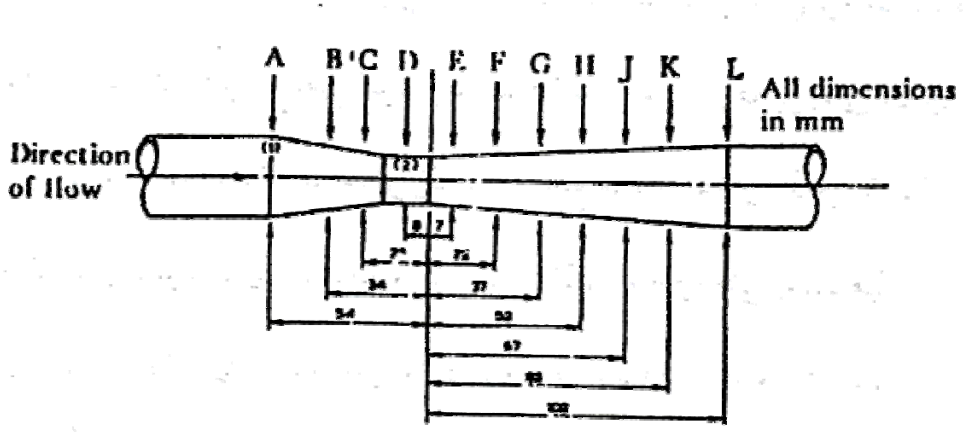
شرح دستگاه

دستگاه آزمایش در شکل ۲ نشان داده شده است. همان‌گونه که در شکل دیده می‌شود دستگاه شامل یک وانتوری است که بر روی آن ۱۱ عدد پیزومتر برای اندازه‌گیری فشار نصب شده است و پیزومترها با لوله‌های لاستیکی شفاف به تابلو عمودی که مدرج شده، وصل می‌شوند. این پیزومترها فشار استاتیک سیال را در نقاط مختلف وانتوری نشان می‌دهند. در بالای لوله‌های مانومترها، لوله‌ی شیشه‌ای قرار دارد که هوا در آن محبوس می‌شود و به کمک شیر سوزنی که بر روی آن نصب شده میزان هوای موجود در آن را می‌توان تغییر داد. برای تراز کردن سطح مانومترها از پایه‌های زیر دستگاه می‌توان استفاده کرد. دستگاه وانتوری توسط یک لوله‌ی شفاف پلاستیکی به خروجی پمپ میز هیدرولیکی وصل می‌شود. در قسمت خروجی وانتوری یک شیر کنترل برای تنظیم دبی جریان در نظر گرفته شده است.



شکل (۲) مجموعه‌ی وانتوری و ماومترهای متصل به آن

همان‌گونه که در شکل ۳ نشان داده شده است، پیزومترهای مختلف روی وانتوری با حروف A تا Lمشخص شده‌اند و فاصله‌ی آن‌ها تا گلوگاه وانتوری نیز معلوم است.



شکل (۳) وانتوری و محل نصب پیزومترها

اندازه‌ی قطر و همچنین نسبت قطر و سطح مقطع به قطر و سطح مقطع گلوگاه که از روی آن‌ها توزیع فشار را می‌توان به‌دست آورد در جدول ۱ آمده‌است.

Piezomerter Tube No. n	*Dia. Of cross-section* d_n(mm)	$\frac{d_۲}{d_n}$	$\left(\frac{a_۲}{a_n}\right)^۲$	$\left(\frac{a_۲}{a_۱}\right)^۲ - \left(\frac{a_۲}{a_n}\right)^۲$
A(۱)	۲۶/۰۰	۰/۶۱۵	۰/۱۴۴	۰/۰۰۰
B	۲۳/۲۰	۰/۶۹۰	۰/۲۲۶	−۰/۰۸۲
C	۱۸/۴۰	۰/۸۶۹	۰/۵۷۵	−۰/۴۳۱
D(۲)	۱۶/۰۰	۱/۰۰۰	۱/۰۰۰	−۰/۸۵۶
E	۱۶/۸۰	۰/۹۵۳	۰/۸۳۰	−۰/۶۸۶
F	۱۸/۴۷	۰/۸۶۷	۰/۵۶۵	−۰/۴۲۱
G	۲۰/۱۶	۰/۷۸۷	۰/۴۰۰	−۰/۲۵۶
H	۲۱/۸۴	۰/۷۳۰	۰/۲۸۹	−۰/۱۴۳
J	۲۳/۵۳	۰/۶۸۰	۰/۲۱۵	−۰/۰۷۱
K	۲۵/۲۴	۰/۶۳۳	۰/۱۶۸	−۰/۰۲۴
L	۲۶/۰۰	۰/۶۱۵	۰/۱۴۴	۰/۰۰۰

جدول(۱) ابعاد وانتوری و محاسبات توزیع فشار ایده‌آل

در این دستگاه نیز برای اندازه‌گیری دبی از میز هیدرولیکی و تانک اندازه‌گیری دبی موجود در آن، مانند دیگر آزمایش‌های مشابه استفاده می‌شود.

روش آزمایش

پس از روشن کردن پمپ، دستگاه را باید کالیبره کرد. کالیبره کردن این دستگاه عیناً مشابه کالیبره کردن دستگاه اندازه‌گیری دبی به کمک وسایل مختلف است و بنابراین از تکرار آن خودداری می‌شود. تنها تفاوت موجود این است

که در موقع کالیبره کردن سطح آب در مانومترها باید روی عدد ۲۰۰ باشد در حالی‌که در دستگاه اندازه‌گیری دبی سطح اولیه آب ۲۸۰ است. پس از کالیبره شدن دستگاه با تنظیم هم‌زمان شیر بعد از پمپ و شیر کنترل بیشترین اختلاف ارتفاع ممکن یعنی ۲۵۰ میلی‌متر را بین ورودی و گلوگاه ایجاد کنید و سپس مانومترهای ورودی و گلوگاه را در جدول شماره‌ی۲ ثبت کنید. به کمک تانک اندازه‌گیری دبی و کرنومتر، دبی سیال را نیز اندازه‌گیری کرده و در جدول ۲ در ستون‌های مربوطه وزن آب و زمان را درج کنید. با بستن تدریجی شیر کنترل دبی را در ۱۰ مرحله کاهش دهید و کلیه‌ی اطلاعات فوق را در جدول ۲ ثبت کنید. برای دبی ماکزیمم و دبی متوسط کلیه مانومترها را در جدول شماره ۳ ثبت نمائید.

محاسبات ونتایج

۱- با تکمیل اطلاعات جدول شماره ۲ و با مقایسه دبی تجربی Q و دبی ایده‌آل که متناسب با $(h_1 - h_2)^{1/2}$ است. منحنی تغییرات $(h_1 - h_2)^{1/2}$ بر حسب Q را رسم کنید و از روی آن مقدار C_d متوسط را به‌دست آورید و با مقادیر C_d جدول ۲ مقایسه کنید.

۲- منحنی تغییرات C_d بر حسب Q را در شکل زیر رسم کنید و میزان تغییرات C_d را ارزیابی کنید.

۳- با انجام محاسبات مربوطه و تکمیل جدول ۳ منحنی تغییرات توزیع فشار در دو دبی مختلف در طول وانتوری را در نمودار زیر رسم کرده و سپس منحنی تغییرات توزیع فشار ایده‌آل را نیز که از جدول ۱ به دست می‌آید ترسیم کرده و آن‌ها را با هم مقایسه کنید.

سوالات تکمیلی

۱- با بررسی منحنی تغییرات توزیع فشار در داخل وانتوری و مقایسه‌ی آن با منحنی ایده‌آل در چه نواحی دو منحنی با هم متفاوت هستند و علت آن چیست؟

۲- میزان دقت محاسبات شما چیست و چه عواملی در آن مؤثرند.

۳- اگر وانتوری به صورت مایل و یا عمودی نصب شود چه تأثیری در اندازه‌گیری دبی دارد با نوشتن روابط مربوطه تأثیر را نشان دهید.

۴- با استفاده از ضریب تخلیه‌ی متوسطی که از آزمایش به‌دست می‌آورید قطر گلوگاه وانتوری را حساب کنید که قطر مقطع ورودی آن ۰/۶ m و اختلاف فشار ورودی و گلوگاه در آن ۰/۸ m باشد. دبی عبوری از این وانتوری ۰/۴ m^3/s است.

$Qty.$ (Kg)	t (s)	h_1 (mm)	h_2 (mm)	$10^4 \times Q$ (m^3/S)	$h_1 - h_2$ (mm)	$(h_1 - h_2)^{1/2}$ ($m^{1/2}$)
۱						
...						
۱۰						

جدول (۲) اطلاعات اولیه و محاسبات Q و $(h_1 - h_2)$

مانومتر	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L
دبی ماکزیمم												
دبی متوسط												

جدول(۳)

آزمایش ششم :آزمایش ضربه جت آب

هدف

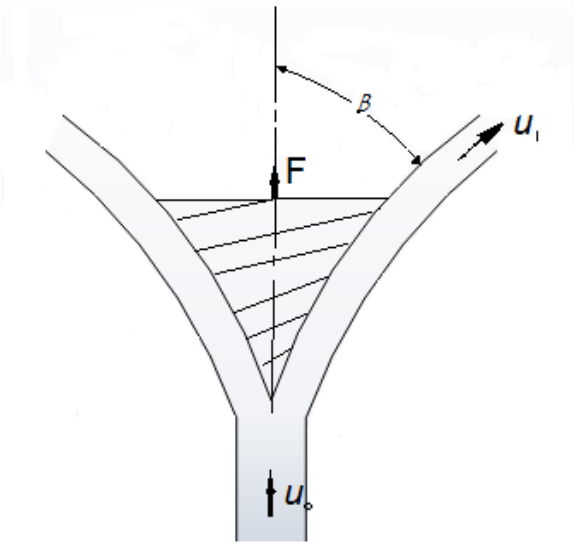
۱- تعیین نیروی جت آب در برخورد به صفحات مسطح و نیم‌کره

۲-مقایسه نتایج حاصل از آزمایش با نتایج به‌دست آمده از محاسبات تغییر ممنتوم سیال

تئوری

هرگاه جت سیالی به پره‌ای برخورد کرده و منحرف شود، نیرویی ایجاد می‌شود که با نرخ تغییرات ممنتوم سیال متناسب است. این نیرو برابر با تفاضل ممنتوم‌های اولیه و نهایی سیال است. شکل۱ را در نظر بگیرید که در آن ممنتوم جت ورودی $\dot{m}u_0$است که درآن$\dot{m}$دبی جریان وu_0 سرعت جت ورودی است. پس از این‌که سیال به اندازه‌ی زاویه‌ی β منحرف شد، ممنتوم در جهتx برابر $\dot{m}u_1 \cos\beta$ است. در نتیجه نیروی وارد به سیال در جهتx برابر $(\dot{m}u_1 \cos\beta - \dot{m}u_0)$ است. بنابراین نیروی وارد بر پره (F) در جهت x برابراست با :

$$F = \dot{m}(u_0 - u_1 \cos\beta) \qquad (1)$$



شکل (۱) جریان آب از روی یک پره خمیده

دوحالت زیر را بررسی می‌کنیم.

۱- صفحه‌ی مسطح

در حالت صفحه‌ی مسطح(شکل۲)، $\beta = ۹۰^{\circ}$ است و در نتیجه $\cos\beta = ۰$ است و معادله‌ی (۱) به صورت زیر ساده می‌شود:

$$F = \dot{m}u_{۰} \qquad (۲)$$

بنابراین نیروی وارد برصفحه، مستقیماً از شار ممنتوم جت محاسبه می‌شود و نیازی به اطلاع از سرعت نهایی جت نیست.

۲- نیم‌کره

در حالت نیم‌کره (شکل۳)، $\beta = ۱۸۰^{\circ}$ است و در نتیجه $\cos\beta = -۱$ است و معادله‌ی ۱ به صورت زیر ساده می‌شود:

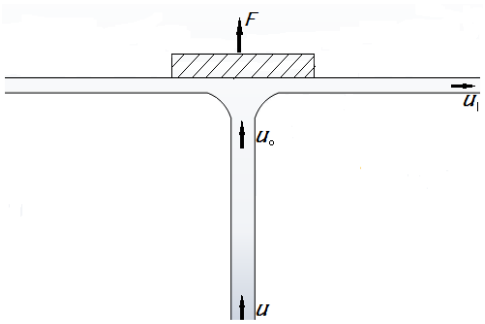
$$F = \dot{m}(u_{۰} + u_{۱})$$

اگر کاهش سرعت ناچیز باشد $u_{۰} = u_{۱}$ است، بنابراین:

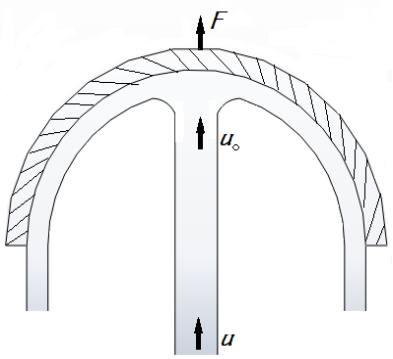
$$F = ۲\dot{m}u_{۰} \qquad (۳)$$

در وسیله‌ای که مورد آزمایش قرار می‌گیرد، اندازه‌گیری $u_{۰}$ ممکن نیست، ولی سرعت u را می‌توان تعیین کرد و باتوجه به اثرات جاذبه و فاصله‌ی s بین سر جت و محل برخورد آن به صفحه، سرعت $u_{۰}$ را از رابطه‌ی زیر به دست می‌آوریم:

$$u_{۰}^{۲} = u^{۲} - ۲gs \qquad (۴)$$



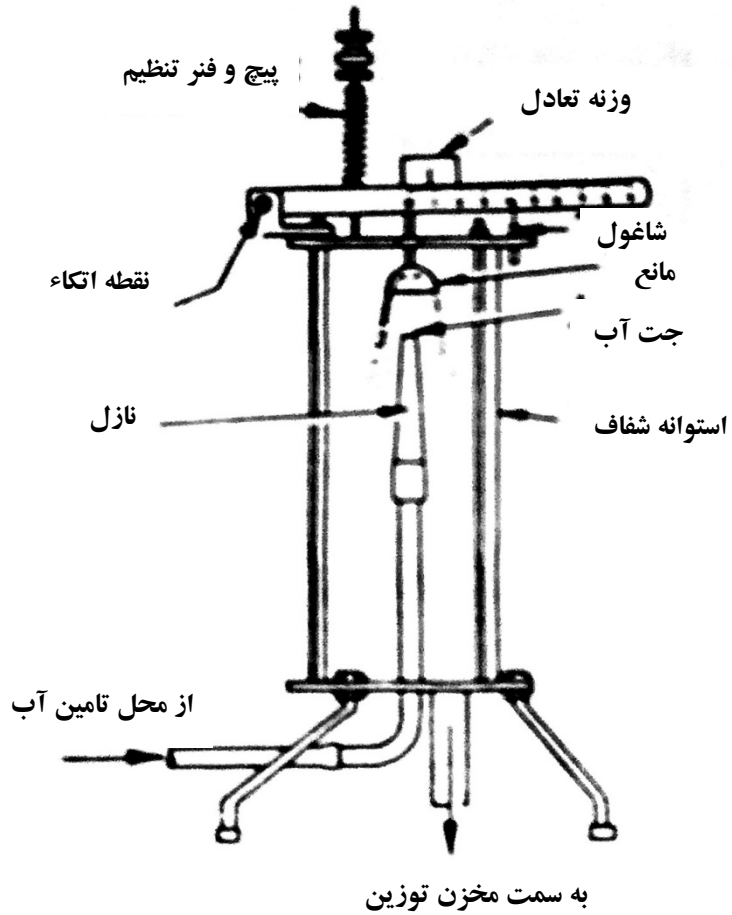
شکل (۳) نیم‌کره



شکل (۲) صفحه‌ی مسطح

شرح دستگاه

قسمت اصلی دستگاه آزمایش ظرف استوانه‌ای شفافی است که توسط تکیه‌گاهی بر روی میز هیدرولیکی قرار می‌گیرد. در داخل ظرف استوانه‌ای، افشانکی قرار دارد که از قسمت پایین ظرف استوانه ای، آب به آن وارد شده و پس از خروج از افشانک، جت آب خروجی به مانع مسطح یا نیم‌کره‌ای برخورد می‌کند. بر روی صفحه‌ی متصل به مانع مجموعه‌ی خط‌کش مدرج، وزنه‌ی تعادل و پیچ و فنر تنظیم قرار دارند که به تکیه‌گاهی متصل بوده وممان نیروی حاصل از جت آب که به هر یک از صفحات وارد می‌شود حول این تکیه‌گاه قابل محاسبه است.



شکل (۴) مجموعه افشانک و متعلقات مربوطه

جدول زیر پاره ای از مشخصات دستگاه آزمایش را شرح می‌دهد.

جرم وزنه‌ی تعادل	فاصله‌ی مرکز تا محور تکیه‌گاه	قطر افشانک (d)	فاصله‌ی سر افشانک تا محل مانع (s)
۰/۶۱۰ kg	۰/۱۵۲۵ m	۱۰ mm	۳۷ mm

جدول (۱) مشخصات دستگاه آزمایش

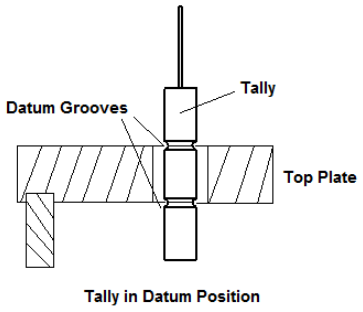
روش آزمایش

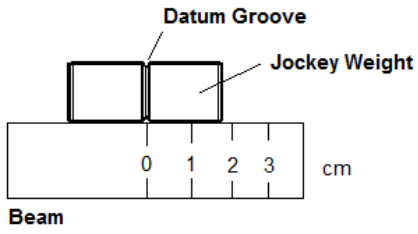
پیش از انجام آزمایش باید دستگاه را کالیبره کرد. برای کالیبره کردن دستگاه باید از پیچ‌های تنظیم موجود در بالای فنر و پیچ‌های پایه‌ی دستگاه و همچنین شاقول کوچک استوانه‌ای موجود، که به خط‌کش مدرج آویزان است، استفاده کرد. دستگاه هنگامی کالیبره خواهد شد که:

۱- وزنه‌ی تعادل روی موقعیت صفر خط‌کش مدرج قرار گیرد (شکل۵).

۲- خط‌کش مدرج در وضعیت کاملاً افقی قرار گیرد. در چنین وضعیتی شاقول استوانه‌ای از پایین و بالای قسمتی که از آن عبور می‌کند، یکسان به‌نظر می‌رسد(شکل۶).

۳- جت آب به صورت کاملاً عمودی به هریک از موانع برخورد می‌کند.





شکل(۵) وزنه تعادل در موقعیت صفر خط‌کش شکل (۶) شاغول در موقعیت تعادل

پس از کالیبره شدن دستگاه، شیرکنترل جریان را باز کنید تا آب با دبی ماکزیمم به مانع برخورد کرده و ضمن اعمال نیرو بر آن، تعادل خط‌کش مدرج به‌هم بخورد که در این‌صورت با جابه‌جا کردن وزنه‌ی تعادل در امتداد خط‌کش، آن را مجدداً به حالت افقی و وضعیت تعادل بازگردانید. پس از برقراری تعادل، فاصله‌ی موقعیت جدید وزنه‌ی تعادل را ثبت کنید و به‌طور همزمان به کمک تانک اندازه‌گیری، دبی مقدار جریان سیال را نیز اندازه‌گیری کنید. با بستن تدریجی شیر کنترل، دبی را کاهش دهید و در هر مرحله پس از برقراری تعادل، مقادیر دبی و فاصله را ثبت نموده و نتایج را در جدول۲ ثبت کنید. آزمایش را از دبی ماکزیمم تا مینیمم در ۸ مرحله تکرار کنید. پس از انجام مراحل فوق پمپ را

خاموش کنید و مانع مسطح را که در ابتدای این مرحله نصب کرده‌اید، خارج کرده و مانع نیم‌کره‌ای را نصب کنید و کلیه‌ی مراحل آزمایش را تکرار نموده و نتایج را در جدول۳ بنویسید.

محاسبات

۱- ثابت کنید که مقدار نیروی وارد بر صفحه‌ی مسطح برابر $F = ۴g\Delta x$ است که در آن Δx فاصله‌ی وزنه‌ی تعادل از نقطه‌ی صفر خط‌کش است. سپس از روی نتایج آزمایش و استفاده از رابطه‌ی فوق، مقادیر نیروی وارد بر هریک از صفحات را محاسبه کرده و در جداول ۲و۳ در ستون ۸ وارد کنید.

۲- برای هر دو مانع با استفاده از روابط ۱،۳،۲و۴ مقادیر نیرو را از تغییر ممنتوم سیال محاسبه کرده و در ستون ۷ جداول ۲و۳ ثبت نمایید.

۳- مقادیر به‌دست آمده‌ی نیروی وارد بر مانع را که از دو روش فوق به‌دست آمده بر حسب یکدیگر رسم کنید(یعنی محور افقی نیروی تغییر ممنتوم و محور عمودی نیروی به‌دست آمده از اندازه‌گیری). بر روی منحنی‌های به‌دست آمده بحث کنید.

سوالات تکمیلی

۱- تطابق نتایج تئوری و عملی چگونه است؟

۲- دقت به دست آمده در اندازه‌گیری نیرو برای هریک از موانع چه‌قدر است؟

۳- اگر منحنی‌های رسم شده‌ی بالا از مرکز عبور نکنند، علل آن چیست؟

۴- چرا نیروی وارد بر مانع نیم‌کره‌ای اندکی کمتر از دو برابر نیروی وارد بر مانع مسطح است؟

۵- در صورتی‌که سطح جریان در مقطع جت یکنواخت نباشد، تأثیر آن بر نتایج چگونه خواهد بود؟

Q (kg)	t (s)	Δx (m)	$\dot{m}$ (kg/s)	u (m/s)	$u_{\circ}$ (m/s)	$\dot{m}u_{\circ}$ (N)	F (N)
۱							
...							
۸							

جدول (۲) نتایج برای مانع مسطح

Q (kg)	t (s)	Δx (m)	$\dot{m}$ (kg/s)	u (m/s)	$u_{\circ}$ (m/s)	$۲\dot{m}u_{\circ}$ (N)	F (N)
۱							
...							
۸							

جدول (۳) نتایج برای مانع نیم‌کره

آزمایش هفتم :اندازه‌گیری نیروی ناشی از هیدرواستاتیک بر یک صفحه و تعیین نقطه اثر آن

آزمایش مرکز فشار

هدف

هدف از انجام این آزمایش اندازه‌گیری نیروی ناشی از فشار هیدرواستاتیک آب بر یک سطح مسطح و تعیین نقطه اثر نیرو بر روی صفحه است.

تئوری

هرگاه جسمی در مایعی غوطه ور شود بر هر یک از سطوح آن از طرف سیال نیرویی وارد می شود که مقدار این نیرو به اندازه سطح، ارتفاع و جنس مایع بستگی دارد.مقدار نیروی وارد بر سطح از اصول اولیه استاتیک سیالات محاسبه می‌شود که به صورت زیر است:

$$F = A\rho g \, sin\theta \, \bar{y} \qquad (۱)$$

که درآن $sin\,\theta$ زاویه‌ای است که امتداد سطح مورد نظر با سطح افق می سازد،$\bar{y}$ فاصله مرکز سطح مورد نظر نسبت به مبدأ مختصات انتخابی است و A اندازه مساحت سطح موردنظر است.همچنین محل نقطه اثر نیرو نیز از رابطه‌ی زیر به دست می‌آید.

$$Y_{C.P.} = \bar{y} + \frac{I_{gg}}{A\bar{y}} \qquad (۲)$$

که درآن I_{gg} ممان اینرسی سطح حول محور عبوری از مرکز سطح است.

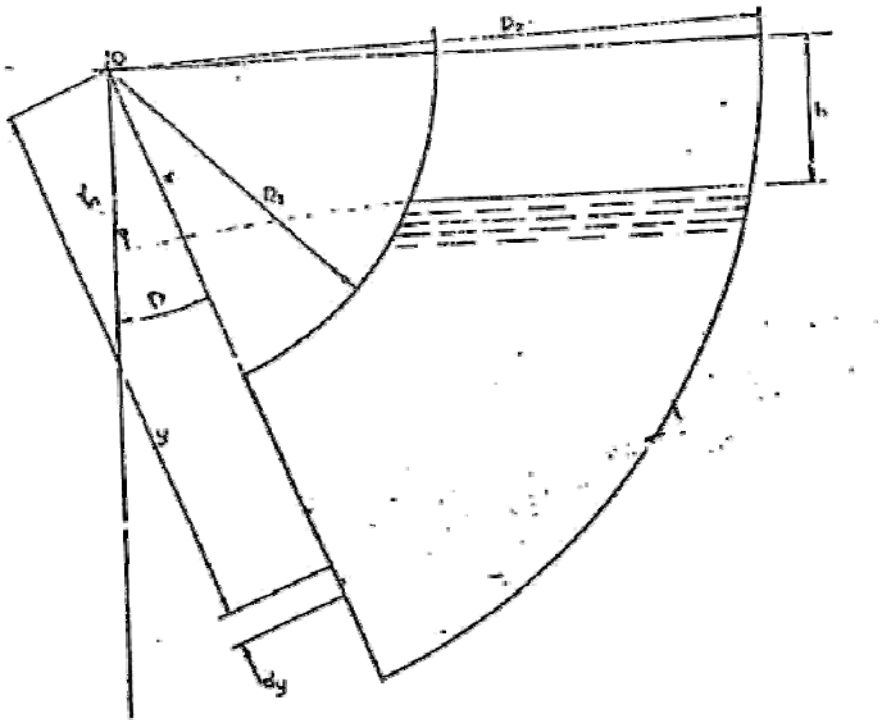
شرح دستگاه

دستگاه آزمایش یک مخزن ربع دایره‌ای است که از جنس پلاستیک فشرده‌ی شفاف ساخته شده است.مخزن شامل یک سطح مسطح مربع شکل،دو سطح مسطح ربع دایره‌ای و دو سطح خمیده ربع دایره‌ای است. مخزن در محل مرکز قسمت ربع دایره‌ای به کمک تیغه‌هایی بر روی تکیه‌گاهی نصب می‌شود و در همین محل به کمک دو عدد پیچ تنظیم زاویه

سطح مربع‌گونه را می‌توان در هر زاویه دلخواهی تنظیم کرد.همچنین در این محل بازویی نیز به محور فوق متصل است که در انتهای این بازو وزنه تعادل و کفه‌ای برای قرار دادن وزنه‌های لازم قرار دارد.فاصله بازو از محل کفه تا محور ۲۵۰ میلیمتر است که با مشخص شدن مقدار وزنه‌ها،کوپل ایجاد شده حول محور تکیه‌گاه قابل اندازه‌گیری است.سیالی که به د اخل مخزن ریخته می‌شود بر تمام سطوحی که با آن در تماس است فشار وارد کرده و در نتیجه ایجاد نیروهایی می کند که این نیروها در روی هر یک از سطوح، نقطه اثر جداگانه‌ای دارند. با استفاده از روابط ۱ و ۲ مقدار نیرو و نقطه اثر آن را می‌توان محاسبه کرد.در هرحال در دستگاه آزمایش موجود نیروی وارد بر دو سطح مسطح کناره یکدیگر را خنثی می‌کند.نیروهای وارد بر سطوح خمیده نیز از مرکز محور تکیه‌گاه عبور کرده و ایجاد ممانی نمی‌کنند.بنابراین فقط نیروی وارد بر سطح مربعی حول محور ایجاد ممان می‌کند که مقدار ممان آن بسته به اینکه سطح مربعی کاملاً غوطه‌ور باشد و یا نه متفاوت بوده و از روابط زیر محاسبه می‌شود:

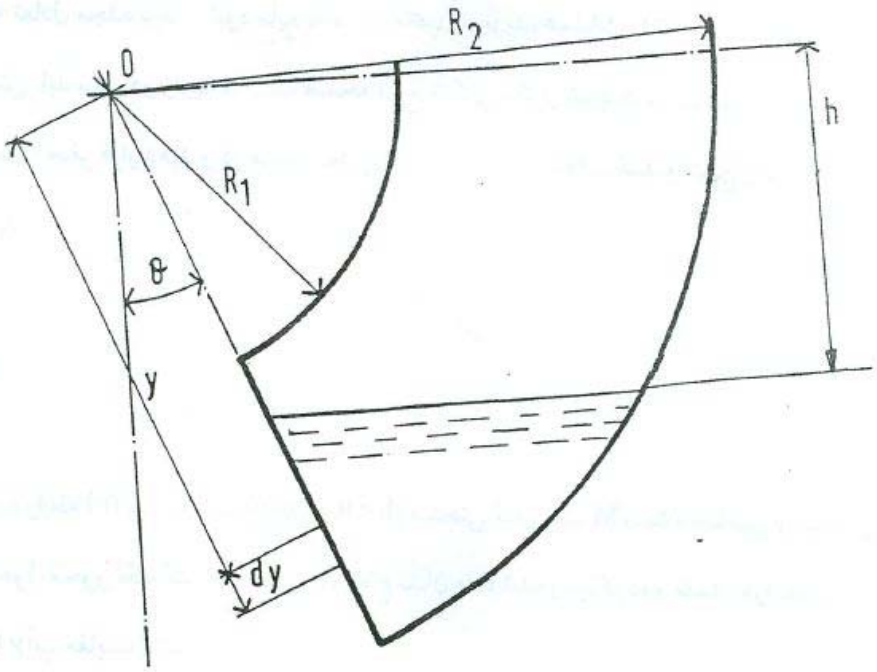
الف) وقتی که سطح کاملاً زیر آب باشد یعنی $(h < R_1 cos\ \theta)$.شکل ۱ را ببینید.

$$M = \frac{\gamma B}{3}\cos\theta\,(R_2^3 - R_1^3) - \frac{\gamma B}{2}(R_2^2 - R_1^2)h \qquad (3)$$



شکل (۱) سطح مربعی کاملا زیر آب است.

ب) وقتی که قسمتی از سطح مربعی زیر آب است یعنی $(R > R_1 cos\theta)$.شکل ۲ را ببینید.



شکل (۲) بخشی از سطح مربعی زیر آب است.

$$M = \frac{\gamma B \cos\theta}{3} R_2^3 - \frac{\gamma B\, R_2^2\, h}{2} + \frac{\gamma B\, sec^2\,\theta\, h^3}{6} \qquad (4)$$

که در روابط فوق γ وزن مخصوص سیال و B عرض مقطع مخزن (عمود بر صفحه کاغذ) است. بقیه پارامترها نیز در شکل‌ها نشان داده شده است.

روش آزمایش

پس از تراز کردن دستگاه به کمک پیچ‌های موجود در زیر آن، کفه خالی را در محل مربوط به آن نصب کنید سپس به کمک پین موجود، بازوی دستگاه را قفل کنید و زاویه مناسب را برای صفحه مربع شکل انتخاب کنید.برای تنظیم زاویه از صفحه مدرج استفاده کرده و از پیچ‌های موجود در بالای دستگاه برای ثابت نگه داشتن ظرف استفاده کنید. پس از تنظیم زاویه دلخواه برای سطح مربعی شکل،به کمک وزنه تعادل موجود در انتهای بازو و در صورت نیاز با گذاشتن وزنه‌های اضافی بر روی کفه شرایطی را ایجاد کنید که بازو در حالت افقی بوده و هیچ‌گونه فشاری نیز بر پین وارد نکند.

مراحل بعدی آزمایش بدین ترتیب است که وزنه های ۲۰ یا ۳۰ گرمی را بر روی کفه قرار دهید و سپس به اندازه‌ای که تعادل مجدد برقرار شود، آب به داخل مخزن بریزید.عملیات را تا پر شدن کامل مخزن ادامه دهید.آزمایش باید برای دو زاویه مختلف صفحه مربع شکل تکرار شود بدین ترتیب که یکبار زاویه تنظیم صفحه را صفر قرار دهید و در مرحله بعد زاویه را ۳۰ درجه انتخاب کنید و نتایج را در جدول های ۱ و ۲ درج کنید.

محاسبات

۱- با توجه به رابطه۳ که منحنی تغییرات M، ممان حاصل از نیروی کفه و وزنه‌ها حول محور تکیه‌گاه، را برحسب h بیان می‌کند، برای حالت $(h < R_1 cos\,\theta)$ منحنی تغییرات M را رسم کرده و مقدار γ را به دست آورید و آن را با γ آب مقایسه کنید.

۲- برای حالت بالا نیروی وارده از طرف سیال بر صفحه مربع شکل را در دو حالت زاویه صفر و زاویه ۳۰ درجه به ازای۵ مقدار مختلف h به دست آورده و نقطه اثر نیرو را در هر حالت حساب کنید.

۳- منحنی تغییرات ممان نیروی هیدرواستاتیک وارد بر صفحه مربع شکل حول تکیه‌گاه را برحسب ممان ناشی از مجموعه وزنه و کفه حول تکیه‌گاه رسم کرده و بر روی آن بحث کنید.

۴- برای حالتی که $(h > R_1 cos\,\theta)$ است در دو حالت زاویه صفر و ۳۰ درجه مقدار نیروی وارد بر صفحه مربع شکل و نقطه اثر آن را به ازای دو h مختلف به دست آورید.

در حالی که $h = 0$ و $\theta = 0$ است مقدار و نقطه اثر نیروی وارد بر هر یک از سطوح پنج‌گانه را به دست آورید.

$\theta = ۰$

M $\mathrm{Kg-m}$	H m	$M + \frac{\gamma B\, R_۲^۲\, h}{۲}$ $\mathrm{Kg-m}$	$h^۳$ $\mathrm{m}^۳$
۱			
...			
۲۰			

جدول شماره (۱)

$\theta = ۳۰$

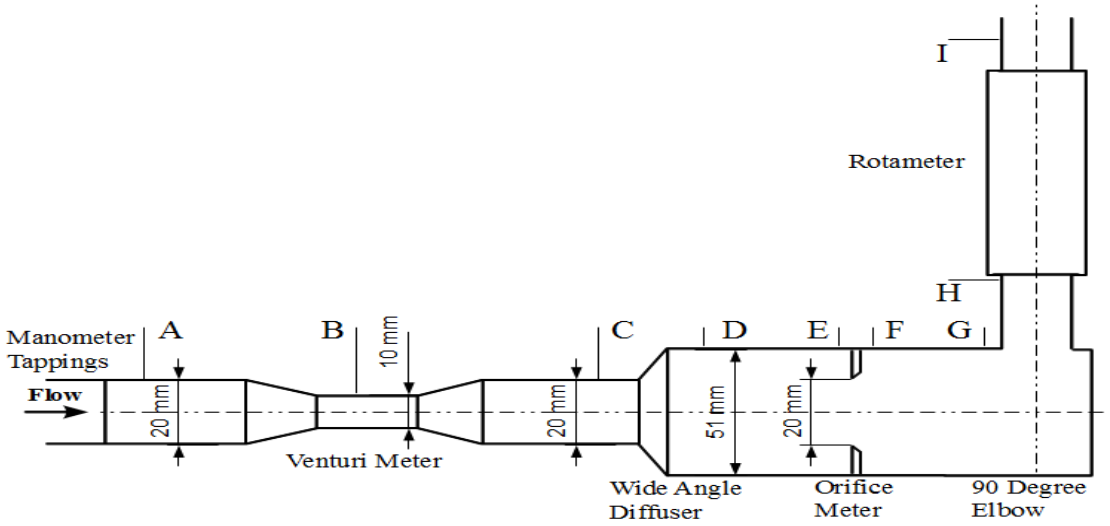
M $\mathrm{Kg-m}$	H m	$M + \frac{\gamma B\, R_۲^۲\, h}{۲}$ $\mathrm{Kg-m}$	$h^۳$ $\mathrm{m}^۳$
۱			
...			
۲۰			

جدول شماره (۲)

آزمایش هشتم :دستگاه اندازه‌گیری دبی در لوله‌ها

مقدمه

اطلاع از مقدار سیال عبوری از مجاری تحت فشار از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است.برای اندازه‌گیری مقدار سیال عبوری که به آن دبی گفته می‌شود از وسایل گوناگونی استفاده می‌شود. دستگاه اندازه‌گیری دبی وسیله‌ی مناسبی است که به‌گونه‌ای طراحی شده تا روش‌های مختلف اندازه‌گیری دبی را در آزمایشگاه به دانشجویان آموزش دهد. در این وسیله ضمن اندازه‌گیری دبی یک سیال غیرقابل تراکم مانند آب، می‌توان کاربرد معادله‌ی انرژی جریان دائم یعنی معادله‌ی برنولی را نیز مورد ارزیابی قرار داد. در این وسیله علاوه‌بر مخزن اندازه‌گیری دبی که در داخل میز هیدرولیکی قرار دارد و دبی را به کمک آن به‌طور مستقیم اندازه می‌گیریم، از وسایل دیگری مانند ونتوری (که یک مجرای همگرا-واگرا است)، اوریفیس (که سوراخی در وسط یک دیسک است) و رتامتر (که مخروط ناقصی با شناوری در داخل آن است) نیز استفاده می‌کنیم. افت انرژی هریک از وسایل فوق را اندازه گرفته و با هم مقایسه می‌کنیم. هم‌چنین افت حاصل از یک افزایش سطح (دیفیوزر) و یک زانویی ۹۰درجه را هم می‌توان سنجید.شکل ۱ مجموعه وسایل اندازه‌گیری با محل نصب مانومترها را نشان می‌دهد. آب از سمت چپ ابتدا وارد ونتوری شده و پس از عبور از دیفیوزر و اوریفیس از زانویی عبور کرده و از طریق لوله‌های شفاف پلاستیکی به تانک اندازه‌گیری دبی می‌ریزد.



شکل (۱) مجموعه‌ی اندازه‌گیری دبی

تئوری

لوله‌ای مانند شکل ۲ که سیال غیرمتراکمی مانند آب از آن عبور می‌کند در نظر بگیرید. همان‌طور که می‌دانیم انرژی سیال در هنگام عبور از داخل لوله بین مقاطع ۱و ۲ تغییر می‌نماید. با فرض جریان دائم و بدون انتقال حرارت تغییرات انرژی را محدود به انرژی داخلی،جنبشی و پتانسیل می‌کنیم و هیچ‌گونه کار محوری هم بر جریان سیال وارد نمی‌شود. در نتیجه معادله‌ی انرژی بر واحد جرم سیال به صورت زیر در می‌آید.

$$\frac{P_1}{\rho g}+\frac{\bar{V}_1^{\,2}}{2g}+z_1=\frac{P_2}{\rho g}+\frac{\bar{V}_2^{\,2}}{2g}+Z_2+\Delta H_{1-2} \qquad (1)$$

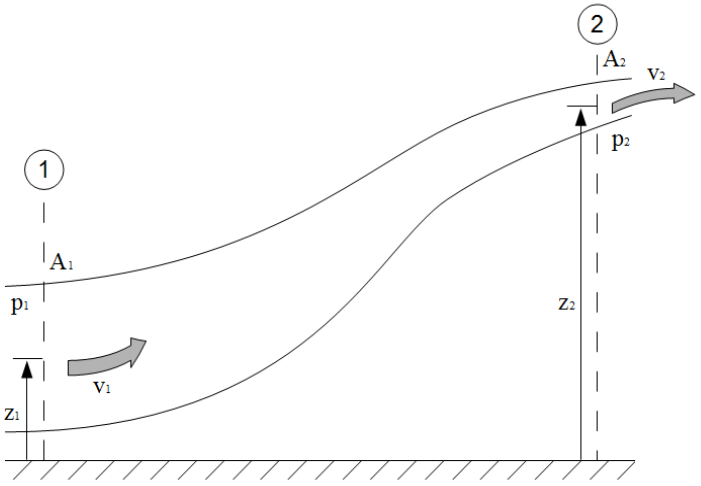
که در آن:

$$\text{هد هیدرواستاتیک}=\frac{P}{\rho g}$$

$$\text{هد جنبشی}=\frac{\bar{V}^2}{2g}$$

$$\text{هد پتانسیل}=Z$$

$$\text{هد کل سیال}=\frac{P}{\rho g}+\frac{\bar{V}^2}{2g}+z$$



شکل (۲) مقطعی از یک جریان لوله

$\Delta H_{۱-۲}$افت هد کل بین مقاطع ۱ و ۲ است و عمدتاً ناشی از تغییر انرژی داخلی است که به‌صورت حرارت تلف می-شود. معادله۱ برای اولین بار در سال ۱۷۴۰ توسط برنولی به‌دست آمد و به معادله برنولی معروف است. نکته قابل توجه در معادله ۱ این است که سرعت‌های به‌کار رفته در مقاطع ۱و ۲ سرعت متوسط مقطع بوده و مقدار آن نیز ثابت فرض می‌شودو مقدار آن از تقسیم دبی بر سطح مقطع به‌دست می‌آید. در عمل به‌علت لزجت سیال و تنش برشی جداره‌ها پروفیل سرعت در مقطع یکنواخت نبوده و انرژی جنبشی برواحد جرم هر مقطعی بزرگتر از $\frac{\overline{V}^{۲}}{۲g}$ است و در واقع معادله-برنولی آن را به‌صورت دقیقی ارزیابی نمی‌کندو باید تصحیحی را در آن اعمال کرد. نکته دیگر این است که، مقدار $\Delta H_{۱-۲}$ در کانال‌های همگرا ناچیز ولی در سطوح واگرا قابل توجه است.

شرح دستگاه

دستگاه آزمایش در شکل ۱ نشان داده شده است. همان‌گونه که پیش‌تر گفتیم آب وارد یک وانتوری شفاف می‌شود که طول قسمت‌های همگرای آن زیاد بوده و سطح مقطع به تدریج کاهش می‌یابد. پس از گلوگاه، سطح به‌تدریج در طول مشابهی افزایش می‌یابد. اندازه‌گیری فشار در قسمت ورودی A و در گلوگاه B و خروجی C صورت می-

گیرد.جریان سپس از یک دیفیوزر عبور می‌کندکه در مقطع خروجی آن (D)، فشار اندازه‌گیری می‌شود و به دنبال آن لوله مستقیمی با سطح مقطع ثابت قرار دارد.در پایین‌دست دیفیوزر، اریفیسی قرار دارد که مانومترهای E و F فشار دو طرف آن را اندازه می‌گیرند (شکل ۳ را ببینید). این اوریفیس بر اساس استاندارد انگلیسیBS۱۰۴ ساخته شده است.پس از طول مستقیمی از لوله یک زانویی ۹۰درجه قرار گرفته که بافشارسنج‌های G و Hبه‌ترتیب فشار ورودی و خروجی آن اندازه‌گرفته می‌شود. در نتیجه افت فشار آن قابل محاسبه است.

رتارمتر که یک سطح مخروطی است و در داخل آن شناوری قرار دارد قسمت بعدی است. مانومترهای H و I به ترتیب ورودی و خروجی رتارمتر را اندازه‌گیری می‌کنند. بر روی روتارمتر خط‌کشی شده تا موقعیت محل شناور را در هر لحظه نشان دهد. موقعیت شناور بستگی به مقدار آب عبوری دارد و هرچه دبی بیشتر باشد،شناور به محل بالاتری می‌رود. پس از رتارمتر آب از شیر کنترل گذشته و وارد تانک اندازه‌گیری و سپس وارد مخزن ذخیره میز هیدرولیکی می‌شود که از آن‌جا مجدداً توسط پمپ جریان به داخل وانتوری پمپ شده و مدار بسته‌ای را تشکیل می‌دهد. البته بین پمپ و ورودی وانتوری نیز یک شیر سوزنی قرار دارد که به کمک آن می‌توان مقدار دبی را تنظیم کرد. در این آزمایش دو هدف مختلف پیگیری می‌شود که شامل اندازه‌گیری دبی به کمک وسایل مختلف و همچنین بررسی و اندازه‌گیری افت فشار در آن‌ها است که ذیلاً هر مورد را تشریح می‌کنیم:

الف) اندازه‌گیری دبی

وانتوری، اوریفیس و رتارمتر هر سه وسایلی هستند که معادله‌ی برنولی را بر آن‌ها می‌توان به‌صورت زیر اعمال کرد:

۱- وانتوری(Venturi)

چون افت فشار بین ورودی و خروجی یک سطح همگرا ناچیز است معادله بین مقطع Aو Bبه صورت زیر می‌شود.

$$\frac{P_A}{\rho g}+\frac{\bar{V}_A^{\,۲}}{۲g}=\frac{P_B}{\rho g}+\frac{\bar{V}_B^{\,۲}}{۲g} \qquad (۲)$$

از طرفی با توجه به معادله پیوستگی داریم:

$$\dot{m}_A=\rho\bar{V}_A A_A=\dot{m}_B=\rho\bar{V}_B A_B \qquad (۳)$$

در نتیجه

$$\bar{V}_B = \left[\frac{۲g}{۱-(\frac{A_B}{A_A})^۲} \times (\frac{P_A}{\rho g} - \frac{P_B}{\rho g})\right]^{\frac{۱}{۲}} \quad (۴)$$

در نتیجه دبی برابر است با:

$$Q = A_B \bar{V}_B = A_B \left[\frac{۲g}{۱-(\frac{A_B}{A_A})^۲} \times (\frac{P_A}{\rho g} - \frac{P_B}{\rho g})\right]^{\frac{۱}{۲}} \quad (۵)$$

در این دستگاه قطر لوله در مقطع A، ۲۶ میلیمترو در گلوگاه B، ۱۶ میلیمتر است بنابراین $\frac{A_A}{A_B}$=۰/۳۸و $A_B = ۲/۰۱ \times ۱۰^{-۴}$ است. با فرض $g=۹/۸ m/s^۲$ و با توجه به اینکه $\frac{P_A}{\rho g}$ و $\frac{P_B}{\rho g}$ به ترتیب ارتفاع‌های مانومترها در مقاطع A و B بر حسب متر است. بنابراین معادله ۵ به صورت زیر می‌شود.

$$Q = ۹/۵۵ \times ۱۰^{-۴}(h_A - h_B)^{\frac{۱}{۲}} \quad (۶)$$

با فرض اینکه جرم مخصوص آب $۱۰۰۰ kg/m^۳$ باشد، دبی جرمی از رابطه زیر به‌دست می‌آید.

$$\dot{m} = ۰/۹۵۵(h_A - h_B)^{\frac{۱}{۲}} (kg/s) \quad (۷)$$

به‌عنوان مثال اگر $h_A = ۳۷۲ mm$ و $h_B = ۱۱۶ mm$ باشد، $(h_A - h_B)^{\frac{۱}{۲}} = ۰/۵۰۵$ بوده و در نتیجه:

$$\dot{m} = ۰/۹۵۵ \times ۰/۵۰۵ = ۰/۴۸۳ \ (\frac{kg}{s})$$

مقدار دبی جرمی اندازه‌گیری شده به وسیله‌ی تانک اندازه‌گیری در چنین حالتی $۰/۴۷ kg/s$ است.

۲-اوریفیس (Orifice)

اوریفیس بین مقاطع E و F نصب شده که در شکل ۳ نشان داده شده است.$\Delta H_{۱-۲}$ در معادله‌ی ۱ برای اوریفیس قابل صرفه‌نظر کردن نیست. در نتیجه معادله را به صورت زیر می‌نویسیم:

$$\frac{\bar{V}_F^2}{2g} - \frac{\bar{V}_E^2}{2g} = \left(\frac{P_E}{\rho g} - \frac{P_F}{\rho g}\right) - \Delta H_{1-2} \quad (8)$$

یا

$$\frac{\bar{V}_F^2}{2g} - \frac{\bar{V}_E^2}{2g} = (h_E - h_F) - \Delta H_{1-2} \quad (9)$$

رابطه‌ی ۹ به این معنی است که افت ΔH_{1-2} باعث کاهش اثر $(h_E - h_F)$ یعنی اختلاف مانومترهای E و F از مقداری که باید باشند می‌شود. تأثیر ΔH_{1-2} در معادله ۹ را به صورت زیر می‌توان نوشت:

$$\frac{\bar{V}_F^2}{2g} - \frac{\bar{V}_E^2}{2g} = k(h_E - h_F) \quad (10)$$

که در آن ضریب k برای اریفیس بکار برده شده ۰/۶۰۱ است. حال با استفاده از رابطه بقای جرم همانند وانتوری رابطه‌ی زیر به‌دست می‌آید.

$$Q = A_F \bar{V}_F = K A_F \left[\frac{2g}{1 - (\frac{A_F}{A_E})^2} \times (\frac{P_E}{\rho g} - \frac{P_F}{\rho g})\right]^{\frac{1}{2}} \quad (11)$$

در دستگاه مورد استفاده قطر قسمت E، ۵۱ میلیمتر و قطر F، ۲۰میلیمتر است.در نتیجه:

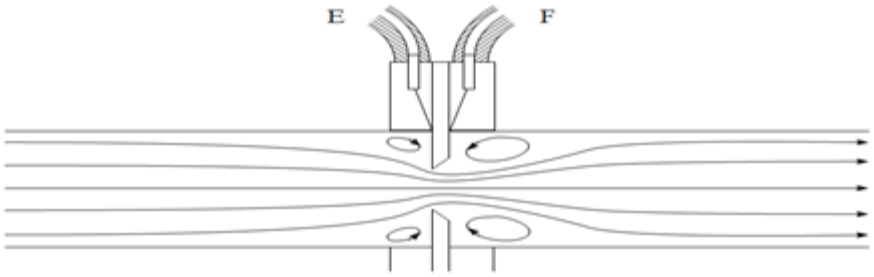
$$Q = 9/10 \times 10^{-4}(h_E - h_F)^{\frac{1}{2}} \quad (m^3/s) \quad (12)$$

یا

$$\dot{m} = 0/910(h_E - h_F)^{\frac{1}{2}} \ (kg/s)$$

برای مثال اگر $h_E = 354$ mm و $h_F = 44$mm باشد، در نتیجه $(h_E - h_F)^{\frac{1}{2}} = 0/55$ می‌شود و

$$\dot{m} = 0/910 \times 0/55 = 0/5 \left(\frac{\text{kg}}{\text{s}}\right)$$



شکل (۳) مقطع اوریفیس بین مانومترهای Eو F

مقدار اندازه‌گیری شده با تانک اندازه‌گیری kg/s ۰/۴۷ است.

۳-رتامتر(Rotameter)

بررسی نتایج مانومتر Hو I که به ورودی و خروجی رتامتر متصل هستند نشان می‌دهد که اولاً اختلاف آن‌ها نسبتاً زیاد است و ثانیا این اختلاف مستقل از دبی جریان است. علی‌رغم وجود جمله‌هایی ناشی از تنش جداره‌ها، معمولاً این جمله ها تابع سرعت جریان است و چون قطر رتامتر زیاد است این جمله ها کوچک است. بیشترین قسمت اختلاف فشار مشاهده شده برای متعادل شدن قطعه شناور و افت فشار حاصل از آن است. چون این افت ثابت است، سرعت محیطی آب هم ثابت است، بنابراین اختلاف فشار مستقل از دبی جریان است.

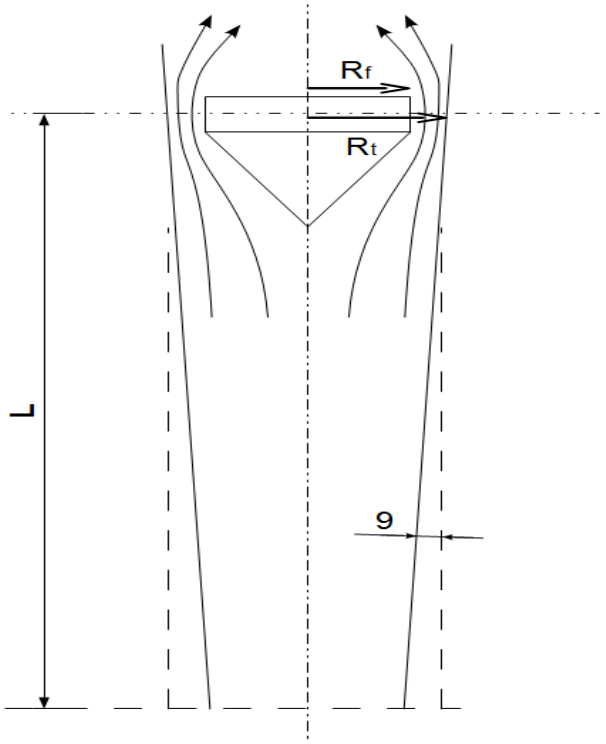
علت اصلی این اختلاف ناشی از جریان تند آب در اطراف قطعه شناور و افت فشار حاصل از آن است. چون این افت ثابت است، سرعت محیطی آب هم ثابت است. بنابراین برای اینکه با افزایش دبی این سرعت بخواهد ثابت بماند سطح مقطع باید تغییر کرده و زیادتر شود. این تغییر سطح مقطع با جابجایی قطعه شناور در داخل مجرای مقطع مخروطی ایجاد می‌شود. از روی شکل ۴ ملاحظه می‌شود که شعاع شناور R_f و شعاع لوله رتامتر R_t است. در نتیجه سطح مقطع عبور جریان برابر است با:

$$\pi\left(R_t^{۲} - R_f^{۲}\right) = ۲\pi R_f \delta = \frac{Q}{V}$$

که $\delta = L\theta$ است که در آن L فاصله‌ی شناور از پایین رتامتر بوده و θ هم نیم‌زاویه‌ی مخروط است. بنابراین:

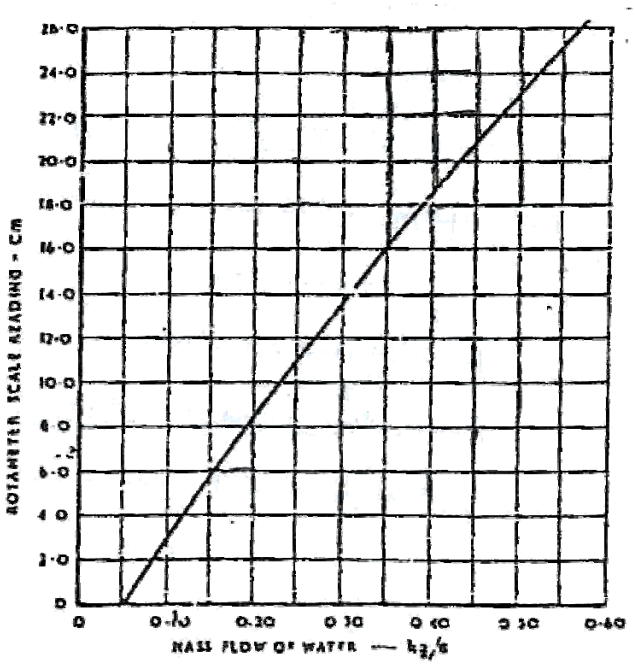
$$Q = ۲\pi R_f \theta V L \qquad (۱۳)$$

که در رابطه بالا کلیه عبارت‌های داخل پرانتز مقادیر ثابتی هستند و بنابراین دبی تابعی از L خواهد بود و با تقریب خوبی رابطه‌ای خطی بین دبی و طول می‌توان انتظار داشت.



شکل (۴) اصول رتامتر

منحنی مشخصه رتامتر مورد استفاده در شکل ۵ نشان داده شده است:



شکل (۵) منحنی مشخصه رتامتر

برای مثال اگر عدد خوانده شده روی رتامتر ۲۲/۵ باشد با استفاده از شکل ۵ دبی جریان ۰/۴۹ kg/s خواهد شد.مقدار اندازه‌گیری شده با تانک اندازه‌گیری ۰/۴۷ kg/s است.

ب) اندازه گیری افت هد:

با استفاده از معادله انرژی ۱ افت هد هریک از وسایل اندازه‌گیری به طریق زیر محاسبه می‌شوند.

۱- وانتوری

با اعمال معادله ۱ بین فشارسنج‌های A و C و با توجه به برابری سرعت‌ها در این دو مقطع که قطر آن‌ها یکسان است داریم:

$$\left(\frac{P_A}{\rho g}-\frac{P_C}{\rho g}\right)=\Delta H_{A-C} \qquad (۱۴)$$

یا

$$h_A-h_C=\Delta H_{A-C}$$

از آن‌جا که افت تابعی از دبی جریان است، آن را برحسب هد جنبشی ورودی یعنی $\frac{\overline{V_A}^2}{2g}$ بی‌بعد می‌سازیم.داریم:

$$\bar{V}_B^{\,2} = \frac{2g}{1 - (\frac{A_B}{A_A})^2} \times (\frac{P_A}{\rho g} - \frac{P_B}{\rho g})$$

و

$$\bar{V}_A^{\,2} = \bar{V}_B^{\,2} \frac{A_B}{A_A}$$

پس

$$\frac{\bar{V}_A^{\,2}}{2g} = (\frac{A_B}{A_A})^2 \frac{2g}{1 - (\frac{A_B}{A_A})^2} \times (\frac{P_A}{\rho g} - \frac{P_B}{\rho g})$$

در دستگاه مورد آزمایش ($\frac{A_B}{A_A} = 0/38$) است، پس انرژی جنبشی ورودی به‌صورت زیر می‌شود.

$$\frac{\bar{V}_A^{\,2}}{2g} = 0/156(h_A - h_B) \qquad (15)$$

به عنوان مثال اگر $h_A = 372$ mm و $h_B = 116$ mm و $h_C = 332$ mm باشد در نتیجه:

$$\Delta H_{A-C} = H_A - H_C = 40\text{mm}$$

و

$$\frac{\bar{V}_A^{\,2}}{2g} = 0/156(h_A - h_B) = 0/156 \times 256 = 40 \text{ mm}$$

پس:

افت= یک برابر انرژی جنبشی ورودی به آن

۲-اریفیس:

با اعمال معادله انرژی ۱ بین فشارسنج‌های E و G داریم:

$$\Delta H_{E-G} = (h_E - h_G) - (\frac{\bar{V}_G^{۲}}{۲g} - \frac{\bar{V}_E^{۲}}{۲g})$$
$$\Delta H_{E-G} = (h_E - h_G) \quad (۱۶)$$

به عنوان مثال اگر $h_A = ۳۷۲\text{mm}$، $h_B = ۱۱۶\ \text{mm}$ $h_C = ۳۳۲\ \text{mm}$ و $h_G = ۳۵۴\ \text{mm}$ باشد آن‌گاه $\Delta H_{E-G} = ۲۶۰\text{mm}$ است و از روی نسبت قطرهای Aو E داریم:

$$\frac{\bar{V}_E^{۲}}{۲g} = \frac{۱}{۱۶} \times \frac{\bar{V}_A^{۲}}{۲g} = ۲/۵$$

در نتیجه نسبت افت به انرژی ورودی برابر است با:

$$\text{افت} = \frac{۲۶۰}{۲/۵} = ۱۰۴$$

۳-رتامتر

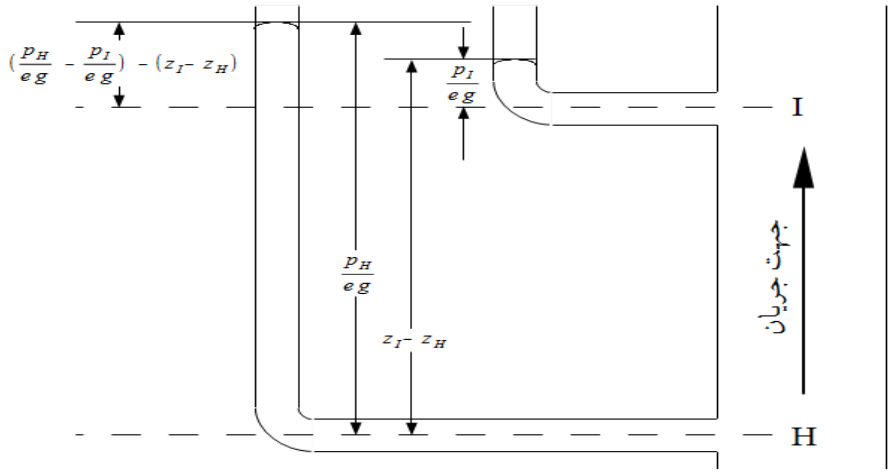
برای این وسیله‌ی اندازه‌گیری،معادله‌ی انرژی بین ورودی I و خروجی H به صورت زیر درمی‌آید:

$$\left(\frac{P_H}{\rho g} + Z_H\right) - (\frac{P_I}{\rho g} + Z_I) = \Delta H_{H-I} \quad (۱۷)$$

در نتیجه با توجه به شکل۶ داریم:

$$\Delta H_{H-I} = (h_H - h_I)$$

افت هد رتامتر تقریبا ثابت و برابر ۱۰۰mm است و بسته به مقدار انرژی ورودی آن نسبت افت مشخص می‌شود.



شکل (۶) افت هد رتامتر

۴-دیفیوزر با زاویه‌ی باز Wide-angle diffuser

ورودی دیفیوزر مقطع C و خروجی آن مقطع D است که با اعمال معادله‌ی انرژی ۱ برای آن داریم:

$$\frac{P_C}{\rho g} + \frac{\bar{V}_C^{۲}}{۲g} = \frac{P_D}{\rho g} + \frac{\bar{V}_D^{۲}}{۲g} + \Delta H_{C-D} \qquad (۱۸)$$

چون نسبت ورودی به خروجی تقریباً ۱ به ۴ است، انرژی جنبشی خروجی ۱/۱۶ انرژی جنبشی ورودی است. بنابراین

برای مثال داریم:

$$h_A = ۳۷۲\ \text{mm}, h_B = ۱۱۶\ \text{mm}, h_C = ۳۳۲\ \text{mm}, h_D = ۳۳۷\ \text{mm}$$

پس

$$\Delta H_{C-D} = (۳۳۲ - ۳۳۷) + (۴۰ - ۲/۵) = -۵ + ۳۷/۵ = ۳۲/۵\ \text{mm}$$

$$\text{نسبت افت} = \frac{۳۲/۵}{۴۰} = ۰/۸$$

۵-زانویی ۹۰ درجه Right-angled bend

ورودی زانویی مقطع G با قطر ۵۱ mm و خروجی آن مقطع H با قطر ۲۶ mm است. با اعمال معادله انرژی ۱ بین

ورودی و خروجی آن داریم:

$$\frac{P_G}{\rho g}+\frac{\bar{V}_G^{۲}}{۲g}=\frac{P_H}{\rho g}+\frac{\bar{V}_H^{۲}}{۲g}+\Delta H_{G-H} \qquad (۱۹)$$

به عنوان مثال :

$$h_A = ۳۷۲\ \text{mm}, h_B = ۱۱۶\ \text{mm}, h_G = ۹۴\ \text{mm}, h_H = ۳۳\ \text{mm}$$

پس

$$\Delta H_{G-H}=\left(\frac{P_G}{\rho g}-\frac{P_H}{\rho g}\right)+\left(\frac{\bar{V}_G^{۲}}{۲g}-\frac{\bar{V}_H^{۲}}{۲g}\right)$$

$$\Delta H_{G-H}=(۹۴-۳۳)+(۲/۵-۴۰)=۲۳/۵\ \text{mm}$$

$$\text{نسبت افت}=\frac{۲۳/۵}{۲/۵}\sim ۹$$

روش آزمایش

برای جلوگیری از وارد شدن فشار به پمپ و بالا بردن عمر آن شیر کنترل و شیر بعد از پمپ را ببندید و آن‌گاه پمپ را روشن کنید تا آب وارد لوله‌ها و وسایل اندازه‌گیری و مانومترها شود. سپس دستگاه را کالیبره کنید[۱]. پس از کالیبره کردن دستگاه شیر کنترل را باز کنید تا سیال جریان پیدا کرده و شناور رتامتر به سمت بالا جابه‌جا شود.با تنظیم هم‌زمان شیر بعد از پمپ و شیر کنترل جریان را به‌گونه‌ای برقرار کنید که مانومترهای A و B بیشترین اختلاف ممکن را نشان دهند که در این صورت مانومتر A حدود ۳۷۰ را نشان می‌دهد و مانومتر B کمتر از ۷۰ میلیمتر می‌شود. در چنین حالتی شناور رتامتر عددی نزدیک به ۲۴ را نشان خواهد داد. به غیر از مانومتر I که در این مرحله قابل خواندن نیست بقیه‌ی مانومترها هر کدام اعدادی را نشان می‌دهند که باید همه‌ی آن‌ها را قرائت کرده و در جدولی مانند دیتاشیت ثبت کرد. به کمک یک عدد کرنومتر که زمان را بر حسب ثانیه اندازه می‌گیرد و تانک اندازه‌گیری دبی، مقدار دبی وزنی سیال را

[۱] روش کالیبره کردن دستگاه: شیرهای بعد از پمپ و کنترل را به آرامی باز کنید تا جریان کامل برقرار شود. سپس شیر کنترل را به تدریج ببندید تا فشار پمپ باعث تراکم هوای بالای مانومترها شود. پس از اینکه شیر کنترل به طور کامل بسته و جریان قطع شد پمپ را خاموش کنید و از طریق شیر سوزنی هوا را وارد محفظه بالای مانومتر کنید. در این حالت سطح آب در مانومترها پایین می‌آید تا به نزدیکی صفر یا زیر صفر برسد. سپس پمپ را روشن کنید که در نتیجه سطح آب در مانومترها بالا خواهد آمد و اگر روی ۲۸۰ متوقف شد دستگاه کالیبره شده است در صورتیکه بیش از ۲۸۰ بود باید مجدداً پمپ را خاموش کرده و عملیات فوق را تکرار کنند. اگر سطح مانومترها کمتر از ۲۸۰ بود، در حالیکه پمپ روشن است مقداری از هوای بالای مانومترها را از طریق شیر سوزنی تخلیه کنید.

هم اندازه گرفته و در دیتاشیت ثبت می‌کنیم. آزمایش را در ۱۱ مرحله تکرار می‌کنیم به گونه‌ای که در مرحله‌ی یازدهم دبی جریان به صفر برسد و کلیه‌ی مانومترها عدد مشابهی را نشان دهند. این عدد مانند عدد به دست آمده در مرحله کالیبره کردن خواهد بود.

پس از انجام مراحل فوق جدولی مانند جدول ۱ تهیه کرده و نتایج محاسبات را در آن بنویسید.

محاسبات

الف)اندازه‌گیری دبی

۱- با استفاده از نتایج آزمایش یعنی ارتفاع‌های مربوط به مانومترهای وانتوری مقدار دبی جریان را محاسبه کنید و سپس مقادیر به‌دست آمده را با دبی به‌دست آمده از روش توزین مستقیم مقایسه کنید و از آن‌جا مقدار ضریب تخلیه را به‌دست آورید. مقادیر ضریب تخلیه‌ی به‌دست آمده در ده مرحله‌ی آزمایش را با هم مقایسه کنید. آیا ضریب تخلیه به عدد رینولدز بستگی دارد. این نتایج را با اطلاعات ارائه شده در کتاب مکانیک سیالات FOX فصل (۸) مبحث مربوط به اندازه‌گیری مقایسه کنید.

۲- عملیات بالا را عیناً برای اوریفیس تکرار کنید.

۳- از روی نتایج به‌دست آمده برای رتامتر یعنی اعداد خوانده شده و همچنین نتایج توزین مستقیم برای اندازه‌گیری دبی آب منحنی مشخصه‌ای برای رتامتر به‌دست آورید و منحنی خود را با منحنی مشخصه‌ی داده شده در این جزوه مقایسه کنید.

ب-افت فشار

برای هر یک از وسایل به‌کار رفته در دستگاه اندازه‌گیری که به ترتیب عبارتنداز:

وانتوری، دیفیوزر، اوریفیس، زانویی ۹۰درجه و رتامتر، مقدار افت را بین خروجی و ورودی آن‌ها از روی نتایج آزمایش به‌دست آورده و آن را با انرژی جنبشی ورودی به هر کدام از وسایل یاد شده مقایسه کنید. یعنی هر وسیله‌ای را نسبت به ورودی خودش.

افت فشار برای وسایل یادشده به صورت زیر هستند:

$$\Delta h_{۱-۲} = h_A - h_C$$ وانتوری

$$\Delta h_{۱-۲} = h_C - h_D$$ دیفیوزر

$$\Delta h_{۱-۲} = h_E - h_G$$ اوریفیس

$$\Delta h_{۱-۲} = h_G - h_H$$ زانویی

$$\Delta h_{۱-۲} = h_H - h_I$$ رتامتر

از مقایسه‌ی میزان افت هر یک از وسایل اندازه‌گیری یعنی (وانتوری، اوریفیس و رتامتر) در مورد نحوه‌ی انتخاب آن‌ها برای یک کاربرد خاص و مزایا و معایب آن‌ها بحث کنید. همچنین در مورد نحوه‌ی ساخت، هزینه‌های ساخت، قیمت تمام شده و دیگر موارد مربوطه‌ی آن‌ها بحث و بررسی کنید.

در حین آزمایش ملاحظه می‌شود که مانومترهای اوریفیس به طور دائم در حال نوسان هستند، علت آن را توضیح دهید.

جدول نتایج آزمایشگاهی																					
شماره آزمایش	سطوح مانومترها (میلیمتر)									رتامتر	وزن	زمان	$m-\dot{kg}/s$				$\Delta H/interkinetic\ head$				
	A	B	C	D	E	F	G	H	I		آب		ونتوری	اورفیس	رتامتر	مخزن	ونتوری	اورفیس	رتامتر	دیفیوزر	زانو
										cm	kg	ثانیه									

جدول ۱ نتایج محاسبات

آزمایش نهم: جریان در لوله و نازل

هدف

منظوراز این آزمایش بررسی توزیع سرعت و افت فشار در جریان داخل لوله‌ها و نازل‌ها می‌باشد.

تئوری

برای سرعت‌های کم سیال در نازل‌ها (شکل۱) جرم مخصوص سیال را می‌توان ثابت فرض نمود. در این صورت با استفاده از معادله برنولی سرعت متوسط سیال در هر مقطع نازل از رابطه زیر به دست می‌آید:

$$P_1 + \frac{1}{2}\rho V_1^2 = P_2 + \frac{1}{2}\rho V_2^2 \qquad (1)$$

$$V_1 = 0 \qquad \Rightarrow \qquad V_2 = \sqrt{\frac{2(P_1 + P_2)}{\rho}}$$

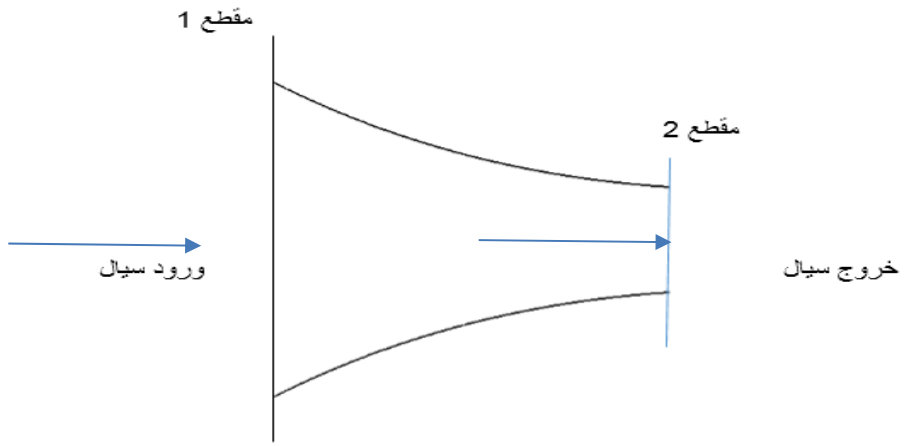
چنانچه سیال گاز ایده‌آل باشد (مثلاً هوا در شرایط آزمایشگاه) جرم مخصوص را می‌توان از رابطه‌ی زیر محاسبه کرد:

$$P = \rho RT \qquad (2)$$

در این رابطه P فشار مطلق گاز R ثابت گاز و T دمای مطلق گاز می‌باشد.

از آنجا که سرعت گاز هنگام ورود به نازل مقطع (۱) شکل ۱ بسیار کم است، فشار مطلق گاز در این نقطه همان فشار اتمسفر (فشار هوای آزمایشگاه) بوده و جرم مخصوص گاز به سهولت با فرض $P = P_{atm}$ و با داشتن دمای گاز هنگام ورود به نازل از رابطه ۲ محاسبه می‌شود. سپس از رابطه ۱ سرعت متوسط سیال محاسبه می‌شود. دبی حجمی سیال به صورت $Q_{ideal} = A_2 V_2$به دست می‌آید که در آن A_2 مساحت مقطع نازل در نقطه (۲) می‌باشد. ولی از آنجا که رابطه ۱ فقط برای سیال ایده‌آل نوشته می‌شود، دبی محاسبه‌شده تقریبی بوده و برای به دست آوردن مقدار واقعی آن از ضریب تخلیه (Coefficient of Discharge) نازل (K) به صورت زیر استفاده می‌شود:

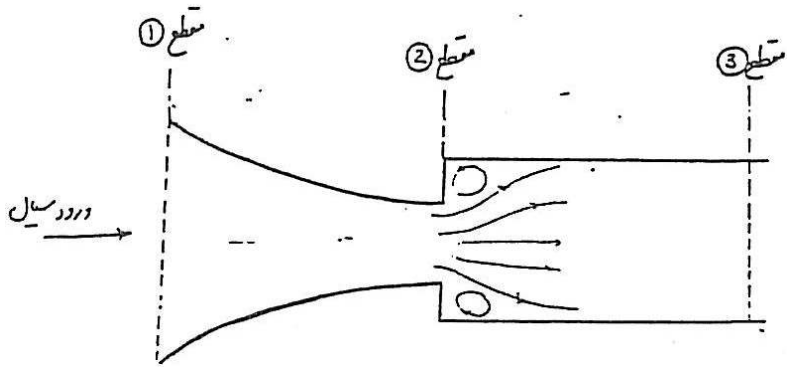
$$Q_{real} = K Q_{ideal} \qquad (3)$$



شکل (۱) جریان سیال در نازل

باید توجه داشت که در جریان واقعی سیال در نازل‌ها، به علت وجود لایه مرزی در مجاورت دیواره نازل، دبی واقعی کمتر از دبی ایده‌آل بوده و ضریب تخلیه K همیشه کمتر از یک است.

در اغلب موارد برای کاهش افت‌های ناشی از ورود سیال به لوله از نصب نازل در دهانه ورودی لوله استفاده می‌شود. بطوریکه سیال در حال عبور از نازل به آهستگی شتاب گرفته و با سرعتی که توزیع آن در نقطه ورود به لوله تقریباً یکنواخت است وارد لوله می‌شود. همگرائی تدریجی نازل از بروز پدیده‌هایی نظیر جدایی جریان و ایجاد نواحی گردابه‌ای که باعث افزایش افت انرژی می‌گردد، جلوگیری می‌کند. ولی چنانچه قطر خروجی نازل برابر قطر داخلی لوله نباشد، انتقال سیال از نازل به لوله به آرامی صورت نمی‌گیرد و افت انرژی افزایش می‌یابد. مثلاً همانطور که در شکل ۲ نشان داده شده است، اگر مساحت مقطع خروجی نازل A۲ کمتر از مساحت مقطع لوله A۳ باشد ، پدیده جدائی جریان و ایجاد نواحی گردابه ای مشاهده می شود. تلفات ناشی از آن به کمک ضریب افت نازل (K) بیان می گردد.



شکل (۲) اتصال نازل به لوله و انبساط ناگهانی سیال

$$h_{lm} = K\frac{\bar{V}_۲}{۲} \qquad (۴)$$

در این رابطه h_{lm} افت جزئی نازل به واسطه انبساط ناگهانی سیال و $\bar{V}_۲$ سرعت متوسط سیال در مقطع (۲) (درست هنگام خروج از نازل) می باشد . ضریب K از رابطه:

$$k = \left(۱ - \frac{A_۲}{A_۳}\right)^۲ \qquad (۵)$$

و یا از شکل ۸,۱۶ کتاب FOX[۲] به دست می‌آید.

اکنون افت فشار سیال ΔP را در لوله در نظر بگیرید. افت فشار برحسب ضریب اصطکاک F به صورت زیر بیان می-شود:

$$\Delta P = F\frac{L}{D}\rho\frac{V^۲}{۲} \qquad (۶)$$

در این رابطه L طول لوله، D قطر داخلی لوله و V سرعت متوسط سیال می‌باشد. در جریان توسعه‌یافته آرام ضریب اصطکاک فقط تابعی از عدد رینولدز بوده و به صورت زیر می‌باشد:

$$F = \frac{۶۴}{Re} \qquad (۷)$$

[۲] Foc & McDonald, " Introduction to Fluid Mechanics" Second Ed. , Wiley, NewYork

در حالیکه جریان توسعه‌یافته مغشوش، ضریب اصطکاک علاوه بر عدد رینولدز می تواند تابعی از زبری نسبی لوله $\frac{\varepsilon}{D}$ نیز باشد. برای لوله‌های صیقلی (نظیر لوله‌ای که در این آزمایش مورد استفاده قرار خواهد گرفت) ضریب اصطکاک به زبری نسبی لوله بستگی نداشته و توسط رابطه معروف بلازیوس Blasius بیان می‌شود.

$$F = ۰/۳۱۶۴\, Re^{-۰/۲۵} \qquad (۸)$$

از رابطه بلازیوس معمولاً در مواقعی که عدد رینولدز Re کمتر از $۱۰^{۵}$است، استفاده می‌شود.

هنگامی‌که سیال از طریق نازل وارد لوله می‌شود، توزیع سرعت تقریباً یکنواخت است. ولی به تدریج به علت رشد لایه‌ی مرزی در مجاورت دیواره لوله، توزیع یکنواخت سرعت تغییر کرده و تغییرات شعاعی سرعت اهمیت پیدا می‌کنند. در فواصل دورتر از دهانه ورودی، ضخامت لایه مرزی آنقدر بزرگ است که لبه لایه مرزی در محل محور مرکزی لوله قرار می‌گیرد. از این نقطه به بعد شکل توزیع سرعت ثابت مانده و سرعت فقط تابعی از فاصله شعاعی از محور مرکزی لوله است. در این حالت وضعیت سیال را اصطلاحاً توسعه‌یافته می‌نامند و این ناحیه از لوله «ناحیه توسعه یافته » نام دارد. همچنین فاصله دهانه ورودی لوله تا محلی که جریان به حالت توسعه‌یافته می‌رسد را «طول ورودی » لوله می‌نامند. طول ورودی لوله برای جریان آرام از رابطه:

$$\frac{l_e}{D} = ۰/۰۶\, Re \qquad (۹)$$

به دست می‌آید که در آن عدد Re بر مبنای قطر داخلی لوله تعریف شده است. برای جریان مغشوش این طول ورودی (l_e) معمولاً بسیار کوتاه بوده و بسته به شرایط سیال در دهانه ورودی، معمولاً کمتر از $۱۰D$ تا $۱۵D$ است.

در جریان توسعه‌یافته و آرام در لوله (Poiseuille Flow) توزیع سرعت به صورت زیر بیان می‌شود:

$$u = V_{max}\left[۱ - (\frac{r}{R})^{۲}\right] \qquad (۱۰)$$

در این رابطه V_{max} سرعت سیال در مرکز لوله، r فاصله شعاعی از مرکز لوله و R شعاع داخلی لوله است.

چنانچه جریان توسعه‌یافته سیال از نوع مغشوش باشد، توزیع سرعت توسط قانون لگاریتمی بیان می‌شود.

$$\frac{u}{u^*} = ۵/۷۵ \log\left(\frac{u^* y}{\nu}\right) + ۵/۵ \qquad (۱۱)$$

در این رابطه $u^* = \sqrt{\frac{\tau_w}{\rho}}$ سرعت اصطکاکی (Frictional Velocity) نام دارد.

τ_w تنش برشی دیوار است و y فاصله از دیوار می‌باشد. $(y = R - r)$

شرح دستگاه

دستگاه آزمایش از یک لوله آلومینیمی به قطر داخلی ۷۶ mm که در یک انتها توسط یک دیفیوزر به فن سانتریفوژ متصل شده،تشکیل شده است. هوا از طریق یک نازل با سطح صیلقی وارد این لوله می‌شود. در این دستگاه از یک نازل با قطر ۴۹,۹۷ mm استفاده می‌شود. برای اندازه‌گیری فشار در نقاط مختلف در امتداد محور نازل یک پروب محوری(Axial Pressure Probe) بر روی دستگاه در ناحیه ورودی لوله نصب شده است. هنگامی‌که نازل کوچک‌تر در دهانه ورودی لوله نصب می‌شود، به واسطه اختلاف قطر نازل و لوله یک انبساط ناگهانی در هوای ورودی مشاهده می‌شود. بعد از این ناحیه طول لوله آنقدر ادامه دارد که جریان درون لوله به حالت توسعه‌یافته می‌رسد. بدین ترتیب در انتهای لوله جریان توسعه‌یافته سیال را می‌توان مورد مطالعه قرار داد.

در امتداد لوله شیرهای فشار (Pressure Taps) قرار گرفته‌اند (جدول ۱) که توسط آنها فشار استاتیک هوای داخل لوله اندازه‌گیری می‌شود. در انتهای لوله قبل از دیفیوزر، طول کوتاهی از لوله از جنس پلاستیک شفاف (Plexy Glass) ساخته شده و درون آن یک پیتوت تیوب (Pitot Tube) نصب شده است. فاصله نوک پیتوت تیوب و شیر فشار شماره ۴ از دهانه ورودی لوله برابر با ۶۱۳۰mm می‌باشد. اندازه‌گیری فشار در فواصل شعاعی مختلف توسط پیتوت تیوب، توزیع سرعت هوا در لوله مشخص می‌سازد. برای اندازه‌گیری فشار از مانومتری که دارای ۲۰ لوله قائم است استفاده می‌شود. دبی هوا توسط یک والو لغزشی (Slide valve)که بعد از فن قرار گرفته تنظیم می‌گردد.

فاصله از دهانه نازل	شماره شیر اندازه‌گیری فشار
۲۵	۱۷
۵۵	۱۶
۱۰۰	۱۵
۲۰۰	۱۴
۳۰۰	۱۳
۵۰۰	۱۲
۷۰۰	۱۱
۹۰۰	۱۰
۱۱۰۰	۹
۲۱۰۰	۸
۳۱۰۰	۷
۴۱۰۰	۶
۵۱۰۰	۵
۶۱۳۰۰	۳ و ۴

جدول(۱) محل شیرهای فشار در لوله

در نازل (با اندازه اسمی ۵۰mm) از پروفیل بیضی استفاده شده است. قطر این نازل در نقاط مختلف از رابطه زیر به دست می‌آید:

$$d = ۱۰۰ - ۵۰\sqrt{۱ - (\frac{۷۵ - l_n}{۷۵})^۲} \quad (۱۲)$$

در این رابط l_n و dبر حسب میلیمتر می‌باشند. (l_n فاصله نقطه مورد نظر روی محور نازل تا دهانه ورودی نازل است).

روش آزمایش

فن را روشن کرده و والو لغزشی را برای دبی مشخصی تنظیم کنید. آزمایش را می‌توان با دبی کم شروع کرد.

۱- نازل (با اندازه اسمی ۵۰mm) را در ابتدای لوله دستگاه آزمایش نصب کرده و پروب محوری را روی آن سوار کنید. در حالیکه هوا از طریق نازل وارد دستگاه آزمایش می‌شود، فشار استاتیک هوا در ده نقطه در ابتدای محور نازل اندازه بگیرید. دمای هوای ورودی و فشار مطلق هوای آزمایشگاه را اندازه بگیرید.

۲- فشار هوای داخل لوله را به کمک شیرهای فشار و مانومتر موجود در کنار دستگاه آزمایش اندازه بگیرید.

۳- در انتهای لوله، در ناحیه‌ای که جریان توسعه یافته است، با حرکت دادن پیتوت تیوب در امتداد شعاع لوله، فشار سکون هوا را در ۲۰ نقطه مختلف اندازه بگیرید.

مراحل ۱ تا ۳ را برای ۳ دبی مختلف تکرار کنید.

محاسبات

۱- منحنی تغییرات فشار استاتیک نازل را برحسب موقعیت مکانی پروب برای کلیه آزمایشات رسم کنید. هر منحنی را با دبی مربوطه نامگذاری کنید. در این دیاگرام منحنی مقادیر تجربی (اندازه‌گیری شده) و منحنی مقادیر تئوری را رسم کرده، آنها را باهم مقایسه کنید، علت اختلاف را شرح دهید.

۲- سرعت هوا، دبی حجمی و عدد رینولدز لوله را به کمک اطلاعات مربوط به نازل، محاسبه کنید.

۳- ضریب افت انرژی را برای انبساط ناگهانی هوا (بعد از نازل) محاسبه کنید. نتیجه را با معادله ۵ مقایسه کنید.

۴- توزیع فشار هوا را از نقطه ورود به نازل تا انتهای لوله برحسب فاصله از دهانه ورودی نازل رسم کنید علت و فشار منحنی را شرح دهید. طول ورودی لوله را تعیین کنید.

۵- ضریب اصطکاک جریان توسعه‌یافته هوا در لوله را محاسبه کرده و نقاط آزمایشی را برحسب عدد رینولدز مربوط رسم کنید. نقاط آزمایش را با رابطه ضریب اصطکاک بلازیوس مقایسه کنید.

۶- سرعت جریان توسعه‌یافته را برحسب مجذور فاصله شعاعی (r^2) برای دبی‌های مختلف رسم کنید. با استفاده از این منحنی، سرعت متوسط، دبی حجمی و عدد رینولدز هوا را محاسبه کرده و با نتایج خواسته (۲) مقایسه کنید.

۷- سرعت هوا در قسمت توسعه‌یافته لوله را به صورت $\frac{u}{u^*}$ برحسب فاصله شعاعی از محور مرکزی لوله برای کلیه آزمایشات رسم کنید. نتیجه را با معادله ۱۱ مقایسه کنید.

آزمایش دهم: جریان در کانال باز

مقدمه

جریان در کانال باز به جریانی گفته می‌شود که سطح آن با اتمسفر در تماس باشد مثل رودخانه‌ها و کانال‌های ساخته‌شده و لوله‌های نیمه پر. چون فشار اتمسفر ثابت است، بنابراین معادله انرژی برای سیال غیر قابل تراکم به صورت زیر در می-آید:

$$Z + {}^{P}/_{\gamma} + {}^{U^{۲}}/_{۲g} = \text{ثابت}$$

که تنها عبارت Z و ${}^{U^{۲}}/_{۲g}$ در کانال باز در نظر گرفته می‌شود:

$$Z + {}^{\mathrm{U}^{۲}}/_{۲\mathrm{g}} = \text{ثابت}$$

جریان در کانال باز ممکن است حالات مختلفی به خود بگیرد و در نتیجه لازم است که اختلاف بین این حالات مشخص شود به طوریکه شرایط و حالات که برای جریان ممکن است رخ دهد و فرضیاتی که لازم است برای یک آنالیز تئوری تعریف شود، صدق نماید .

جریان یکنواخت (Uniform Flow)

جریان یکنواخت در یک کانال باز هنگامی رخ می‌دهد که سرعت سیال از یک مقطع کانال تا مقطع دیگر از نظر مقدار و جهت تغییر کند.

برای یک سیال غیر قابل تراکم با یک سطح آزاد شرایط زیر لازم است تا جریان یکنواخت باشد.

۱- بستر کانال باید دارای شیب باشد.

۲- عمق سیال در طول کانال باید یکسان (ثابت) بماند.

۳- سطح مقطع کانال باید ثابت بماند.

جریان غیر یکنواخت(Non-Uniform Flow)

جریان غیریکنواخت هنگامی رخ می‌دهد که سطح سیال موازی با بستر کانال نباشد و یا اینکه یکی یا هر دو شرایط دیگر صادق نباشد.

جریان دائم (Steady Flow)

جریان دائم به جریانی گفته می‌شود که جریان در هر نقطه مشخص با زمان تغییر نکند.

جریان غیردائم (Unsteady Flow)

جریان غیر دائم جریانی است که تابع زمان باشد.

جریان آرام و جریان مغشوش (Laminar and Turbulent Flow)

شرایط آرام و مغشوش همانند لوله‌ها در اینجا نیز به وسیله نسبت نیروی چسبندگی و نیروی اینرسی مشخص می‌شود و نسبت این دو نیرو همانطور که قبلاً گفته شده عدد رینولدز است.

$$Re_{No} = \frac{WUl}{\mu} = \frac{WUm}{\mu}$$

که در آن :

W = وزن مخصوص سیال μ = چسبندگی سیال

U = سرعت متوسط جریان l= مشخصه طول

m : برای کانال باز نسبت $m = \frac{A}{P}$ را معادل l می‌گیرند که به آن عمق متوسط هیدرولیکی می‌گویند (A سطح مقطع جریان و P محیط خیس‌شده است).

کمترین مقدار مرزی (بحرانی) عدد رینولدز برای کانال باز ۶۰۰ می‌باشد و این مشخص می‌کند که در تمام قسمت‌های مهندسی در کانال باز جریان توسعه‌یافته مغشوش وجود دارد.

(TranquilandRapidFlow)

جریان منقلب همانند جریان آرام می‌تواند جریانی آهسته و یا سریع باشد.

* هنگامیکه سرعت جریان به حدی کم باشد که امواجی که بر اثر ضربه برروی آب ایجاد می‌شوند، بتوانند به راحتی به بالادست و پائین‌دست جریان حرکت کنند، به آن جریان آهسته (Tranquil) می‌گویند.

* اگر سرعت جریان برابر سرعت حرکت امواج ضربه‌ای باشد به آن جریان بحرانی می‌گویند.

* در حالتیکه سرعت جریان بیشتر از سرعت حرکت امواج ضربه‌ای باشد، جریان آب امواج را جارو کرده و در محل ضربه گوشه تیزی تشکیل می‌شود، به چنین حالتی جریان منقلب سریع می‌گویند.

بطور کلی نسبت سرعت متوسط جریان به سرعت حرکت امواج ضربه‌ای را که عدد بدون بعدی است و به عدد فرود(Frode) مشهور است به عنوان مبنا در نظر می‌گیرند.

$$F_r = \frac{\bar{U}}{\sqrt{gh}}$$

در حالتیکه عدد F_r مساوی یک باشد جریان بحرانی است. $F_r = ۱$

اگر عدد F_r کمتر از یک باشد جریان آهسته است. $F_r < ۱$

وقتی عدد F_r بزرگتر از یک است جریان سریع می باشد. $F_r > ۱$

آشنایی کلی با دستگاه کانال باز

این دستگاه شامل سه قسمت اساسی می‌باشد:

۱) پمپ و مخزن آب

۲) مکانیزم اندازه‌گیری وزن آب

۳) کانال باز شیب‌دار و تانک ورودی

۱- تانک آب مخزن مکعب مستطیل شکلی است که از بالا باز بوده و دارای حجم کافی می‌باشد تا هنگامیکه پمپ در قدرت ماکزیمم کار می‌کند بتواند آب مورد نیاز کانال را تامین کند. پمپ از نوع پمپ یک طبقه با کوپله مستقیم بوده و پره آن گریز از مرکز و با سرعت ثابت می‌باشد، شدت جریان سیال به وسیله یک شیر کنترل که روی لوله خروجی تعبیه شده تنظیم می‌شود.

۲- مکانیزم اندازه‌گیری همانند مکانیزم بکار رفته در میزهای هیدرولیکی می‌باشد با این تفاوت که حجم آن بزرگتر است. این مکانیزم شامل یک تانک با یک شیر خروجی می‌باشد که بر روی یک بازوی تعادل با نسبت سه بر یک سوار شده است و وزنه‌ای بکار رفته در انتهای بازو مشخص کننده مقدار آب جمع شده در تانک می‌باشد که به کمک کورنومتر می‌توان زمان لازم برای جمع شدن مقدار مشخصی آب را به دست آورد و در نتیجه دبی را محاسبه نمود.

۳- کانال شیب‌دار، از جنس شیشه مخصوص ساخته شده است و به وسیله تعدادی بست فلزی بر روی یک چارچوب فلزی بسته شده است (تا از وسط خم نشود (شکم ندهد)) .

طول کانال ۱۶ فوت (حدود ۴/۹ متر) و عرض آن ۳ اینچ (۷/۶۲ سانتیمتر) و عمق آن ۶ اینچ (۱۵/۲۴ سانتیمتر) است. در قسمت ورودی کانال مخزن نسبتا عمیقی قرار داده شده و در داخل آن نیز دو صفحه توری نصب شده است تا اغتشاش‌های جریان را کاهش دهد.

برروی کانال دو ریل هادی تعبیه شده که این ریل‌ها متصل به چارچوب فلزی می‌باشند و بر روی این ریل‌ها وسایل اندازه‌گیری عمق دریچه‌ها و مدل‌ها بسته می‌شوند.

وسیله اندازه‌گیری عمق میله دندانه داری است که روی یک غلطک دندانه‌دار کوچک جابجا می‌شود و عمق را تا تقریب ۰/۱ اینچ به دقت اندازه‌گیری می‌کند.

آزمایش شماره ۱

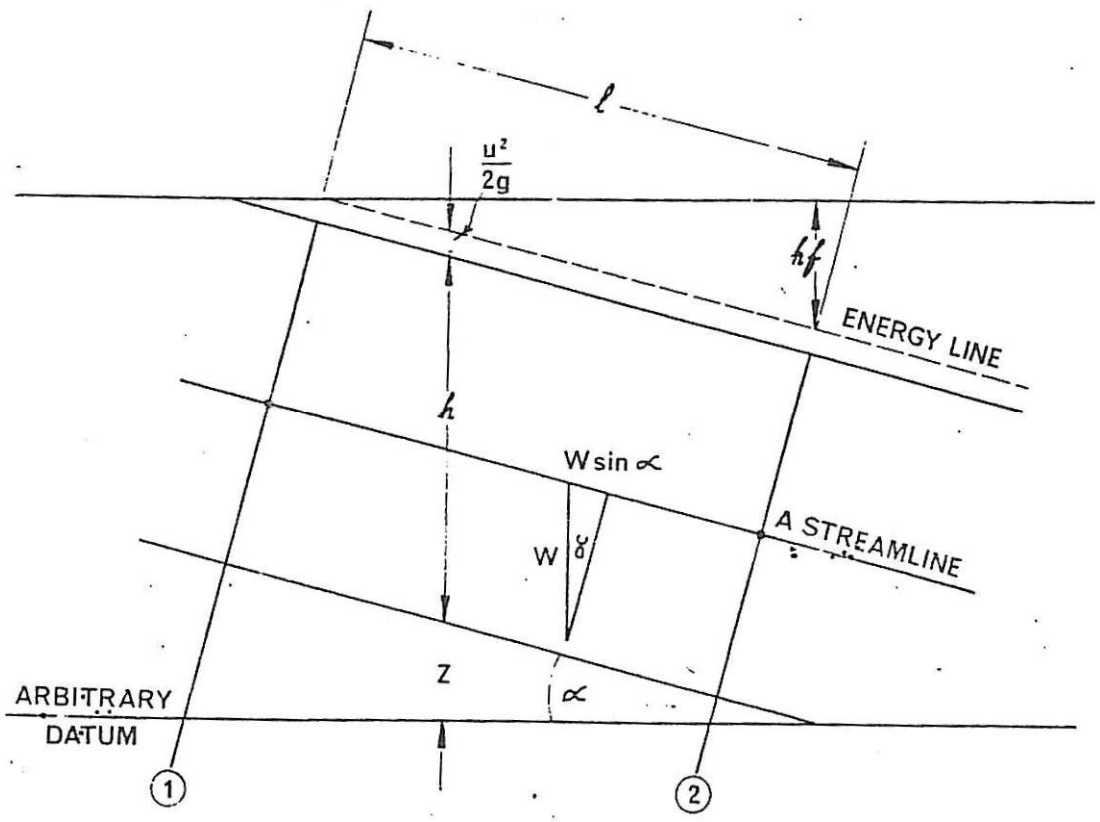
جریان یکنواخت دائم

هدف

هدف از انجام این آزمایش مطالعه جریان یکنواخت دائم در کانال و به دست آوردن ضرایب (Chezy) برای دبی‌های مختلف و مقایسه آن‌ها با نتایج تئوری می‌باشد.

تئوری

حجم مشخصی از سیال رابین صفحات ۱ و ۲ (شکل ۱) در نظر بگیرید.



شکل (۱) حجم مورد نظر از سیال

کل انرژی در هر نقطه برابر است با $(z+h)+\frac{U^2}{2g}$

بنابراین رابطه انرژی بین دو نقطه ۱ و ۲ به صورت زیر است:

$$(z_1 + h_1) + \frac{U_1^2}{2g} = (z_2 + h_2) + \frac{U_2^2}{2g} + h_{f_{1-2}}$$

که $h_{f_{1-2}}$ افت انرژی بین مقطع ۱ و ۲ می‌باشد.

حال اگر جریان یکنواخت و دائم باشد، نتیجه می شود که $h_1 = h_2$ و $u_1 = u_2$ و بنابراین:

$$z_1 - z_2 = h_f$$

از طرفی

$$\frac{z_1 - z_2}{l} = \sin\alpha \qquad \Rightarrow \qquad h_f = l \sin\alpha$$

به علت اینکه عمق در مقاطع ۱ و ۲ یکسان است فشار هیدرولیکی دردو انتهای حجم باید یکسان باشد.

نیرویی که باعث حرکت می‌شود مؤلفه وزن حجم بین صفحات (۱ و ۲) و نیروی ناشی از تنش برشی که در خلاف جهت حرکت در سطح تماس سیال و کف کانال اثرمی‌کند می‌باشد.

$$W \sin\alpha = \tau \cdot s \qquad W = wl\,A \qquad s = p \cdot l$$

که در آن

W = وزن مخصوص سیال

l = فاصله بین صفحات ۱ و ۲

A = سطح مقطع جریان

p = محیط خیس شده از جریان

τ_o = تنش برشی در دیواره‌ها

بنابراین

$$wAl\sin\alpha = \tau_o\, p\, l \qquad \Rightarrow \qquad \tau_o = \frac{A}{p}\, w\, \sin\alpha = \frac{A}{p}\, wi$$

که در آن $i = \sin\alpha = \frac{h_f}{l}$ گرادیان انرژی است.

اگر جریان را کاملاً مغشوش در نظر بگیریم در نتیجه اثر چسبندگی قابل صرفه‌نظر بوده و تنش برشی در دیواره‌ها متناسب با فشار دینامیکی می‌باشد یعنی:

$$\tau_o = f\,\frac{۱}{۲}\rho U^{۲}$$

که در آن f ثابت تناسب یا ضریب اصطکاک است.

بنابراین :

$$f\,\frac{۱}{۲}\rho U^{۲} = \frac{A}{p}\, wi$$

از طرف دیگر داریم:

$\rho = \frac{w}{g}$ و $\frac{A}{p} = m$ (عمق هیدرولیکی)

پس :

$$f.\frac{۱}{۲}\frac{w}{g}U^{۲} = m\, wi \;\Rightarrow U = \sqrt{\frac{۲g}{f}} \times \sqrt{mi}$$

$$\sqrt{\frac{۲g}{f}} = c \qquad (chezy \text{ ثابت})$$

$$U = c\sqrt{mi} \qquad chezy \text{ معادله}$$

معادله فوق معادله Chezy برای جریان یکنواخت دائم در یک کانال می‌باشد.

قبلاً مشخص شده که f و در نتیجه c ثابت‌هایی هستند که تابع زبری سطح کانال می‌باشند، همچنین اکنون می‌دانیم که این‌ها متأثر از اندازه و شکل سطح مقطع جریان نیز هستند که وابستگی به وسیله عدد رینولدز (Re) و عمق متوسط هیدرولیکی (m) مشخص می‌شوند.

روابط زیادی به کار برده شده تا بتوانند یک معادله‌ای که رابطه بین این مقادیر را که از طریق تجربی به دست می‌آیند بیان کنند که در این آزمایش از رابطه Manning استفاده می‌شود. (روابط دیگر را می‌توانید از کتاب‌های مرجع مکانیک سیالات و هیدرولیک در مورد کانال‌های باز به دست بیاورید).

فرمول Manning به صورت زیر است:

$$c = \frac{۱/۴۹}{n} m^{۱/۶}$$

که درآن n ضریب زبری Manning است و m عمق متوسط هیدرولیکی است. ضریب زبری Manning بدون بعد نیست و مقادیر جدول زیر آنرا برحسب واحد فوت – ثانیه برای سطوح مختلف کانال‌ها بیان می‌کند.

Type of surface	n
Smooth cement, planed timber	۰/۰۱
Rough timber, canvas	۰/۰۱۲
Cast iron, good masonary, brickwork	۰/۰۱۳
Vitrified clay, Asphalt, good concrete	۰/۰۱۵
Rubble masonary	۰/۰۱۸
Firm gravel	۰/۰۲۰
Canals and Rivers in good condition	۰/۰۲۵
Canals and Rivers in poor condition	۰/۰۳۵

جدول (۱) ضریب زبری

با بکار بردن مقادیر مناسب n و m در فرمول Manning مقدار c برای قرار دادن در معادله Chezy به دست می‌آید.

تذکر : قبل از انجام هر کاری توجه داشته باشید که این‌ها فقط برای جریان یکنواخت دائم و توسعه‌یافته مغشوش و رینولدز بالابه کار می‌رود.

برای محاسبه مقدار عدد (R_e) $Re = \frac{w.U.d}{\mu}$ مقدار μ را از جدول زیر استخراج می‌کنیم (با فرض داشتن U سرعت و d عمق متوسط و $W = ۶۲/۴\ {}^{lb}/_{ft^۳}$).

Tempretur (°C)	Viscosity of water (${}^{lb}/_{ft.\,s}$)
۰	$۱۲/۰۴ \times ۱۰^{-۴}$
۱۰	$۸/۷۹ \times ۱۰^{-۴}$
۲۰	$۶/۷۳ \times ۱۰^{-۴}$
۳۰	$۵/۳۸ \times ۱۰^{-۴}$

جدول (۲) مقدار μ

شرح دستگاه

دستگاه شامل کانال شیبدار و وسیله اندازه‌گیری عمق و همچنین یک دریچه آبگیر خروجی می‌باشد که در انتهای کانال به دو صورت دریچه و یا سرریز برای کنترل عمق جریان مورد استفاده قرار می‌گیرد.

همچنین از یک کرنومتر نیز در طول آزمایش برای اندازه‌گیری دبی استفاده می‌شود.

روش آزمایش

دریچه آبگیر را در انتهای کانال قرار دهید و آنرا کاملاً ببندید تا آبی عبور نکند و کانال را تقریباً تا نیمه پر از آب کنید. شیر بعد از پمپ را ببندید و پمپ را خاموش کنید تا آب در کانال راکد شود. در حالیکه آب در حال آرام شدن است یک وسیله اندازه‌گیری عمق در خط وسط کانال قرار دهید و سپس در فاصله ۱۰۰ اینچ پائین‌دست آن یکی دیگر از وسایل اندازه‌گیری نصب کنید.

به کمک دسته مخصوص، شیب را طوری تنظیم کنید که عمق آب در قسمت پائین‌دست ۱/۴ اینچ بیشتر از محور وسط باشد، در چنین حالتی کف کانال دارای گرادیان ۱/۴۰۰ خواهد شد. دریچه را باز کنید و پمپ را روشن کنید.

دریچه و شیر بعد از پمپ را طوری تنظیم کنید که عمق جریان در محور وسط کانال حدود ۱/۲ اینچ باشد. پس از اطمینان از یکنواخت شدن جریان، دبی و عمق را یادداشت نمایید و در جدولی مانند جدول زیر ثبت کنید. (آزمایش را تا دبی ماکزیمم ادامه دهید).درجه حرارت آب را هم ثبت کنید.

تذکر: در استفاده از عمق‌سنج ابتدا باید آنرا بر مبنای کف کانال کالیبره نمود (یعنی صفر خط‌کش آن منطبق با نوک سوزن در کف کانال باشد).

ضریب c	دبی $\dot{Q}$	m	سرعت u	سطح خیس شده P	سطح A	متوسط d	شیب i	زمان t	وزن آب W	عمق
	ft^3/s		ft/s	ft	ft^2	in		s	lb	in

توجه:در جریان‌های بالا مقداری اغتشاش در ورودی کانال ایجاد می‌شود و این به علت انقباض جریان می‌باشد و در بالاتر از دو تا سه فوت طول اولیه کانال دیگر ظاهر نمی‌شود و بنابراین اندازه‌گیری عمق را از این فاصله به بعد باید شروع کرد.

محاسبات

۱- دبی جریان را محاسبه کنید.

۲- سطح مقطع و محیط خیس شده را به دست آورید.

۳- سرعت جریان و عمق متوسط هیدرولیکی را محاسبه کنید.

۴- از روی نتایج فوق ضریب ثابت Chezy $\left(C = \frac{U}{\sqrt{mi}}\right)$ را به دست آورید.

۵- با استفاده از فرمول Manning و با فرض ضرایب زبری n (که از جدول صفحات قبل می‌توانید استخراج کنید).

به ازای $n = ۰/۰۱, ۰/۰۰۹, ۰/۰۰۸, ۰/۰۰۷۵$، ضریب C را به دست آورده و با نتایج به دست آمده از قبل با هم مقایسه کنید و در صورت اختلاف، خطاهای موجود در آزمایش را بیان کنید.

۶- با استفاده از جدول ضمیمه μ را در درجه حرارت مربوطه از جدول استخراج کرده و عدد رینولدز را $Re = \frac{W.U.d}{\mu}$ برای ماکزیمم و مینیمم جریان به دست آورید.

آزمایش شماره ۲

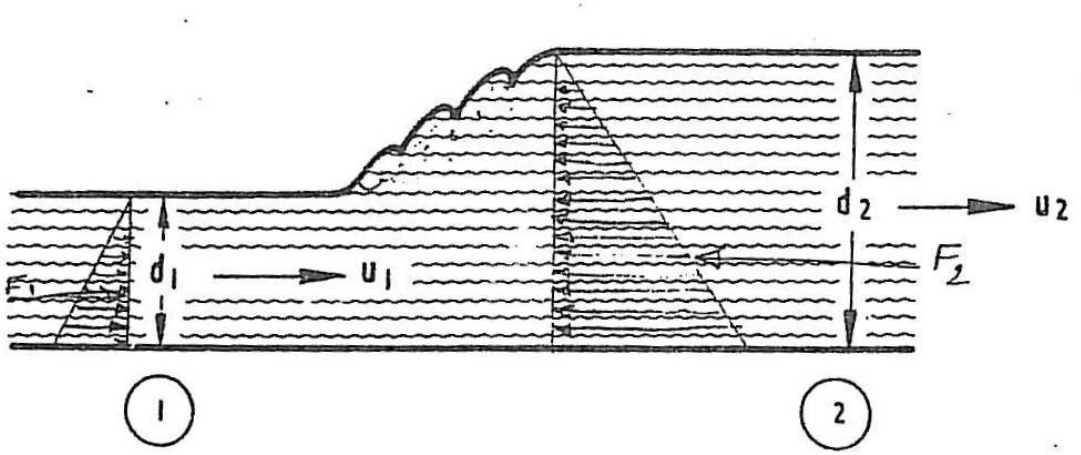
تغییر عمق در پرش هیدرولیکی

هدف

هدف از انجام این آزمایش به دست آوردن رابطه بین دبی جریان و عمق آن قبل و بعد از پرش هیدرولیکی و همچنین بررسی انرژی مخصوص می‌باشد.

تئوری

کانال مشخصی را با عرض b و با دبی Q و مقدار دبی بر واحد عرض $q = {Q}/{b}$در نظر بگیرید.دیاگرام زیر جریان را در دو طرف پرش هیدرولیکی نشان می‌دهد.



شکل (۱) پرش هیدرولیکی

با به کار بردن قانون بقای جرم در دو طرف پرش هیدرولیکی داریم:

$$Q = U_1 b d_1 = U_2 b d_2 \qquad (1)$$
$$q = U_1 d_1 = U_2 d_2$$

اگر جریان دائم و یکنواخت باشد ما می‌توانیم خطوط جریان را اساساً مستقیم و موازی در نظر بگیریم و با به کار بردن نیروی هیدرواستاتیکی و معادله ممتنوم در طول پرش هیدرولیکی داریم:

نرخ تغییر ممتنوم = نیرو

نیرو $F = \bar{X}WA$ ($\bar{X}$ = عمق مرکز سطح)

تغییرات ممنتوم $\Delta M = \rho Q \Delta U$ (ΔU = تغییر در سرعت)

بنابراین

$$W(bd_۱)\frac{d_۱}{۲} - W(bd_۲)\frac{d_۲}{۲} = \rho Q(U_۲ - U_۱)$$

$$W\frac{b}{۲}(d_۱^{۲} - d_۲^{۲}) = \frac{Wqb}{g}(\frac{q}{d_۲} - \frac{q}{d_۱})$$

$$\frac{۱}{۲}(d_۱ - d_۲)(d_۱ + d_۲) = \frac{q^{۲}}{g}(\frac{d_۱ - d_۲}{d_۱ d_۲})$$

$$\frac{۲q^{۲}}{g} = d_۱ d_۲(d_۱ + d_۲) \qquad (۲)$$

معادله(۲) را می‌توان طوری نوشت که شامل عدد Frodeدر بالادست پرش باشد.

$$q = U_۱ d_۱$$

$$\frac{۲(U_۱ d_۱)^{۲}}{g} = d_۱ d_۲(d_۱ + d_۲) = d_۱ d_۲ d_۱\left(۱ + \frac{d_۲}{d_۱}\right)$$

$$\frac{۲U_۱^{۲} d_۱^{۲}}{g} = d_۱^{۲} d_۲(۱ + \frac{d_۲}{d_۱})$$

$$\frac{2U_1^2}{gd_1} = \frac{d_2}{d_1}(1 + \frac{d_2}{d_1})$$

$$F_r = \frac{U_1}{\sqrt{gd_1}} \qquad \Rightarrow \qquad \frac{U_1^2}{gd_1} = F_r^2 \qquad \Rightarrow \qquad 2F_r^2 = \frac{d_2}{d_1}(1 + \frac{d_2}{d_1})$$

شرح دستگاه

دستگاه آزمایش همانند حالت قبل است که فقط یک دریچه ای در فاصله ۳ فوتی اول کانال قرار داده‌ایم که جریان از زیر آن عبور می‌کند و باعث ایجاد پرش هیدرولیکی می‌شود.

روش آزمایش

دریچه تنظیم را در ۳ فوتی اول کانال نصب کنید و دبی و ارتفاع دریچه را طوری تنظیم کنید که در حالت اول ارتفاع قبل از پرش حدود ۰/۳اینچ باشد، بعد به ازای دبی‌های مختلف عمق قبل و بعد از پرش را به دست آورید و جدول زیر راتکمیل کنید.

نتایج آزمایش				محاسبات		
عمق بالا دست d_1	عمق پائین دست d_2	وزن آب $W_{(lb)}$	زمان (ثانیه) t	$d_2 + d_1$	$d_2 d_1 (d_1 + d_2)$	$2q^2/g$

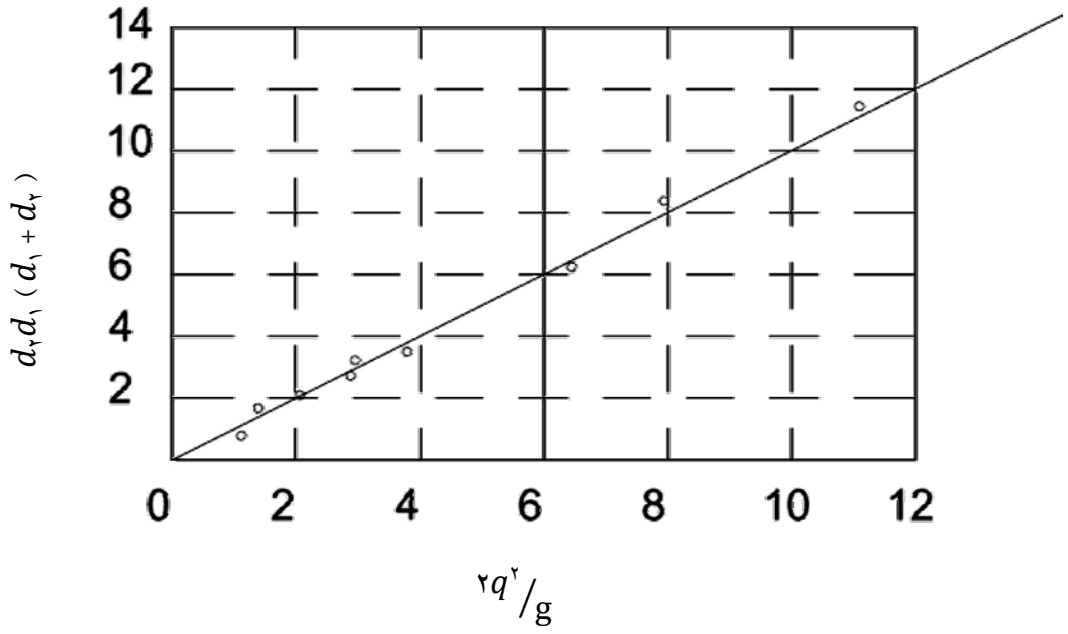
محاسبات

۱- مقدار دبی و دبی بر واحد سطح و $۲q^۲/g$ را محاسبه کنید.

۲- منحنی تغییرات ($d_۱ + d_۲$) $d_۲d_۱$ برحسب $۲q^۲/g$ را رسم کرده و با مقایسه آن منحنی تئوری که در شکل زیر آمده به روی نتایج به دست آمده در آزمایش بحث کنید و علل خطا را بنویسید.

۳- توضیح دهید که چرا درکانال پرش هیدرولیکی اتفاق می‌افتد.

۴- آیا در محل پرش هیدرولیکی افت انرژی وجود دارد؟ اگر هست به چه صورت؟



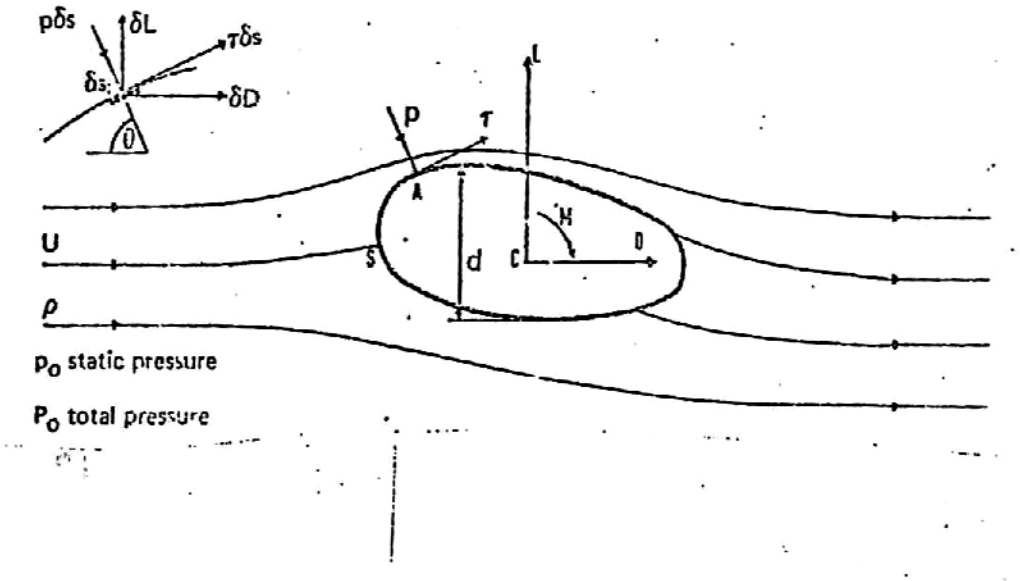
آزمایش یازدهم: اندازه‌گیری نیروی مقاوم روی اجسام دو بعدی

هدف

اندازه‌گیری و محاسبه نیروی مقاوم بر اجسام دو بعدی به طریقه‌های مختلف و مقایسه آن‌ها.

تئوری

جسمی دو بعدی با مقطع غیر مشخص را در نظر بگیرید که مقطع آن در طول جسم یکنواخت است. این جسم در جریان سیالی با حجم مخصوص ρ قرار گرفته که سرعت سیال قبل از رسیدن به جسم U و فشار استاتیک آن ρ_0 و فشار کل آن P_0 می‌باشند. نیروهای وارده از طرف سیال برروی جسم مثلاً در نقطه A عبارتند از نیروی ناشی از فشار که عمود بر سطح است و نیروی ناشی از تنش برشی که مماس بر سطح است.



شکل (۱) جریان اطراف جسم دو بعدی

مجموع اثرات فشار و تنش برشی به صورت یک نیروی منتجه بر جسم اعمال می‌شود که آن را می‌توان به صورت زیر تجربه کرد به طوریکه همگی بر نقطه C اعمال می‌شوند.

- یک مولفه در جهت Uبا شدت D به ازای واحد طول جسم که آنرا نیروی مقاوم $(Drag)$ می‌نامند.

- یک مولفه عمود بر جهت U باشدت L به ازای واحد طول جسم که آنرا نیروی بالاتر *(Lift)*می‌نامند.
- یک گشتاور حول نقطه C با شدت M به ازای واحد طول جسم که به گشتاور پیچاننده معروف است.

این مولفه‌ها را می‌توان به صورت‌های بدون بعد زیر نوشت

ضریب نیروی مقاوم $C_D = \frac{D}{\frac{1}{2}\rho U^2 d}$

ضریب نیروی بالابر $C_L = \frac{L}{\frac{1}{2}\rho U^2 d}$

ضریب گشتاور پیچاننده $C_M = \frac{M}{\frac{1}{2}\rho U^2 d^2}$

که معمولاً ضخامت جسم در امتداد عمود بر U به عنوان بعد مناسبی برای d به کارمی‌رود. (استثنائاً درمورد ایروفویل (*aerofoil*) طول جسم از نوک تا انتها قطعه در امتداد جریان برای d به کار می‌رود).

ضرایب نیروی مقاوم و بالابر را می‌توان از روی ضریب فشار که به صورت $C_P = \frac{P}{\frac{1}{2}\rho U^2}$و ضریب اصطکاک که به صورت $C_f = \frac{\tau}{\frac{1}{2}\rho U^2}$تعریف می‌شوند به دست آورده در شکل ۱ اگر طول δs در امتداد سطح باشد و عمود بر این سطح با U زاویه θ بسازد، نیروی D برابر خواهد شد با:

$$\delta D = (P\cos\theta + \tau\sin\theta)\delta s$$

و کل نیروی مقاوم وارده بر جسم برابر خواهد بود با

$$D = \oint (P\cos\theta + \tau\sin\theta)\, ds$$

که $\oint$ انتگرال روی تمام سطح را نشان می‌دهد. این معادله را به صورت زیر می‌توان نوشت:

$$\frac{D}{\frac{1}{2}\rho U^2 d} = \frac{1}{d}\oint \left(\frac{P}{\frac{1}{2}\rho U^2}\cos\theta + \frac{\tau}{\frac{1}{2}\rho U^2}\sin\theta\right) ds$$

$$C_D = \frac{1}{d}\oint (C_P \cos\theta + C_f \sin\theta)\, ds \qquad (1)$$

$$C_L = \frac{1}{d}\oint (C_f \cos\theta - C_P \sin\theta)\, ds \qquad (2)$$

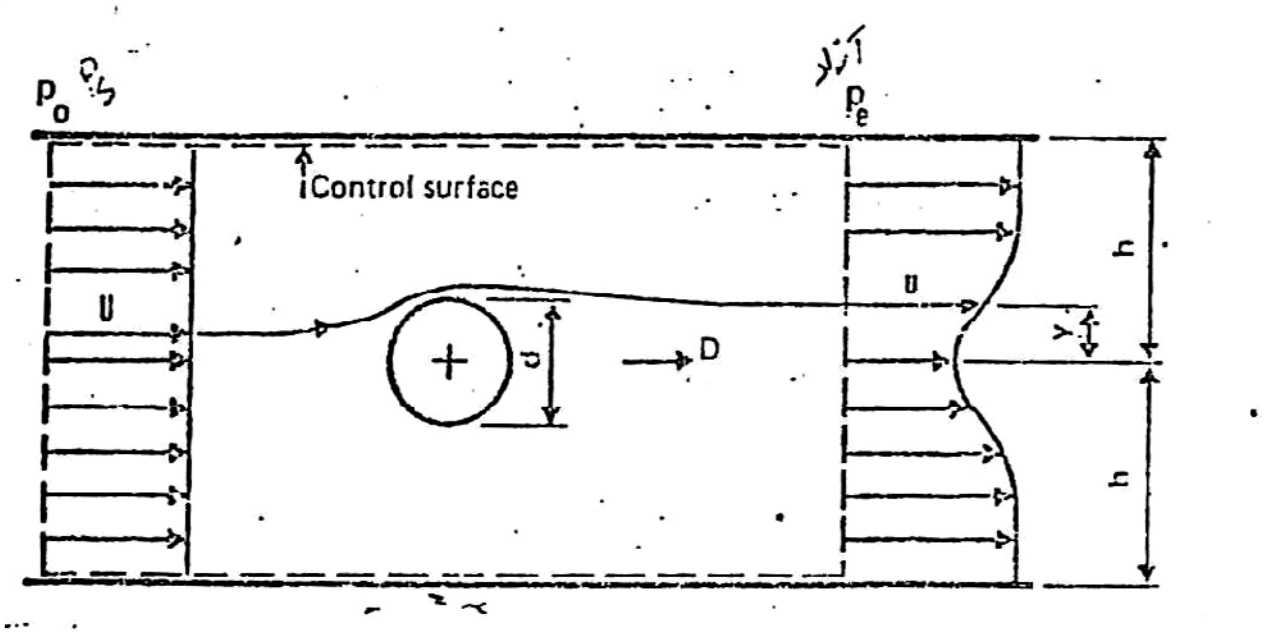
اگر جسم به صورت استوانه با شعاع قاعده R باشد در آن صورت:

$$ds = R\, d\theta$$

لازم به توضیح است که در مورد استوانه C_f در مقابل C_P قابل صرفه‌نظر کردن است و معادله ۴ و ۵ را می توان خلاصه نمود. ضمناً به علت تقارن، برای استوانه

$$C_L = C_M = 0 \qquad \Longrightarrow \qquad C_D(\text{برای استوانه}) = \int_0^{\pi} C_P \cos\theta \; d\theta$$

روش کاملاً متفاوت دیگری که برای تعیین نیروی مقاوم به کار گرفته می‌شود استفاده از معادله مقدار حرکت است.



شکل (۲) توزیع سرعت قبل و بعد از استوانه

مطابق شکل ۲ استوانه در داخل کانالی به عرض $۲h$ قرار گرفته است. سرعت هوا پشت سر استوانه یکنواخت نیست بلکه به فاصله آن از سیلندر و از جداره‌های کانال بستگی دارد، لیکن فشار آن را می‌توان یکنواخت (P_e) در نظر گرفت.

نیروهای وارد بر حجم معیار نشان داده شده در جهت x به ازای واحد طول استوانه عبارتنداز:

در سطح استوانه $= -D$

بعد از استوانه $= -۲hP_e$

قبل از استوانه $= ۲hP_۰$

با توجه به اینکه مقدار حرکت خروجی منهای مقدار و حرکت ورودی به حجم معیار برابر است با کل نیروهای وارده بر آن در جهت x، خواهم داشت:

$$۲h(P_۰ - P_e) - D = \int_{-h}^{h} \rho u^۲ dy - \int_{-h}^{h} \rho U^۲ dy$$

یا

$$C_D = \frac{D}{\frac{۱}{۲}\rho U^۲ d} = \frac{۲h}{d}\frac{P_o - P_e}{\frac{۱}{۲}\rho U^۲} + \frac{۲h}{d}\int_{-۱}^{۱}\left(۱ - \frac{u^۲}{U^۲}\right)d\eta \qquad (۳)$$

که در آن

$$\eta = \frac{y}{h}$$

$h =$ نصف عرض کانال $= \frac{۱۰}{۲} = ۵\text{cm}$

$P_۰ - P_e =$ اختلاف فشار استاتیکی جداره کانال با محیط خارج

$$\frac{۱}{۲}\rho U^{۲} = P_{\text{مخزن}} - P_{\text{دیواره}}$$

باید توجه داشت که معادله ۳ ضریب نیروی مقاوم را محدود به ضریب فشار نمی‌کند بلکه اثر اصطکاک را نیز در بر دارد.

شرح دستگاه و روش آزمایش

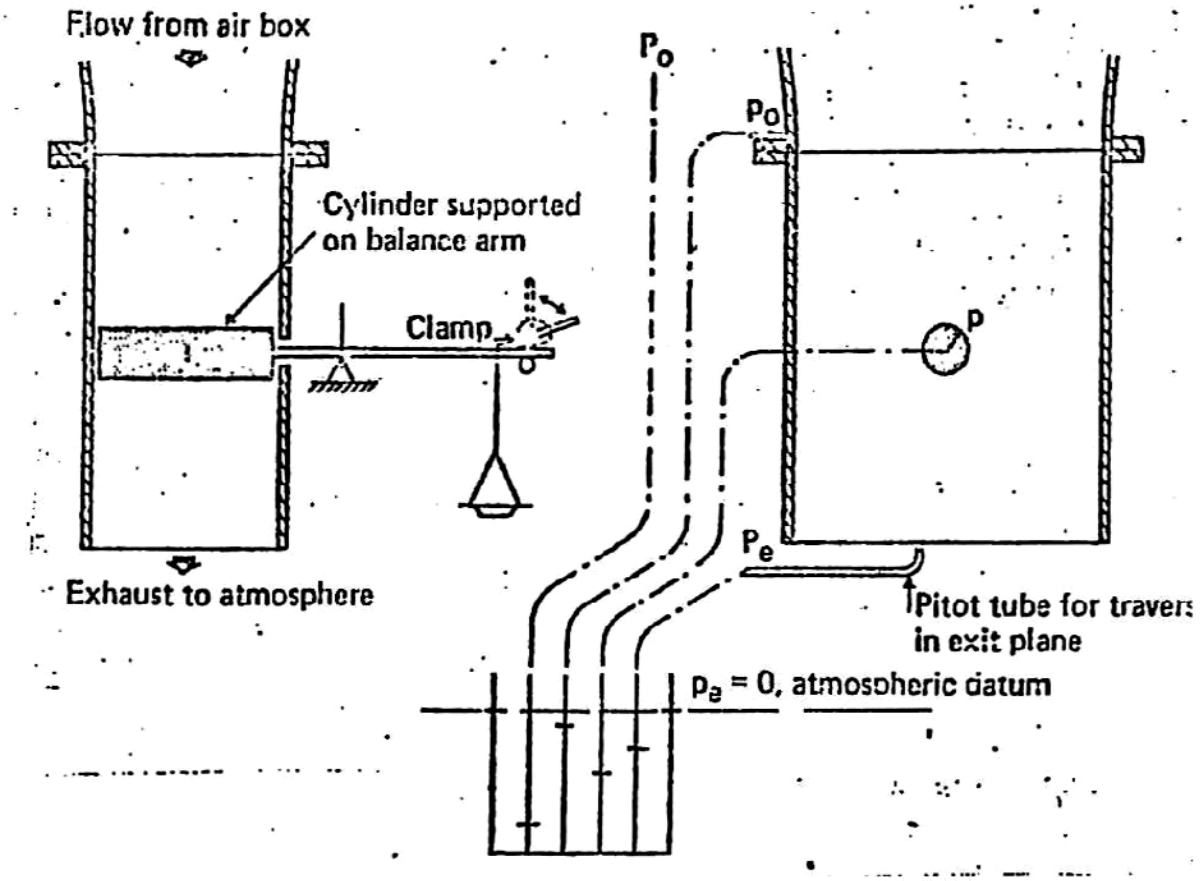
کانال شفاف مستطیلی شکل به خروجی مخزن هوا وصل می‌شود که جسم مورد آزمایش و ترازو را می‌توان روی آن مطابق شکل ۳ سوار کرده نیروی مقاوم را می‌توان به روش‌های مختلف اندازه‌گیری یا محاسبه نمود.

الف)اندازه‌گیری مستقیم

قطعه استوانه‌ای را بر روی اهرم ترازو که به کانال وصل است سوار کنید و با جابه‌جا کردن پیچ روی اهرم بیرونی موازنه را برقرار کنید. جریان هوا را روی حداکثر قرار دهید و با قرار دادن وزنه در کف ترازو تعادل را برقرار کنید. این آزمایش را در هشت مرحله با کاهش دبی هوا انجام دهید و هر بار مقدار وزنه، فشار سکون مخزن $P_{\circ}$ ، فشار استاتیک خروجی مخزن P_e را یادداشت کنید. این عمل را برای ایروفویل (aerofoil) و صفحه مسطح نیز تکرار کنید.

ب) تعیین نیروی مقاوم از روی توزیع فشار

ترازو را از روی کانال برداشته و استوانه‌ای را که یک سوراخ بر روی آن است و یک صفحه مدرج هم در یک انتهای آن نصب است داخل کانال قراردهید و به وسیله یک لوله لاستیکی سوراخ خروجی جریان استوانه را به یکی از لوله‌های مانومتر وصل کنید. این مانومتر فشار روی سطح P را نشان خواهد داد. جریان را روی کمی کمتر از حداکثر قرار دهید و از زاویه صفر درجه شروع کرده و هر بار زاویه را ۵ درجه اضافه کرده فشارهای $P_{\circ}$ ، P_{e} ، P را یادداشت کنید. از ۹۰ درجه به بعد می‌توانید فواصل ۱۰ درجه را به جای ۵ درجه انتخاب کنید.



شکل (۳) اندازه‌گیری نیروی مقاوم به روش‌های مختلف

ج) تعیین نیروی مقاوم از روی افت فشار و توزیع سرعت در کانال

نمونه استوانه‌ای را داخل کانال قرار داده و لوله پیتوت متحرک را روی خروجی کانال سوار کنید. دبی هوا را نزدیکی حداکثر قرار دهید و از یک دیوار کانال شروع کرده با تغییر فاصله از دیوار به فواصل ۵ یا ۱۰ میلیمتر هر بار مقدار فشار کل و فاصله از دیوار را یادداشت کنید. در نزدیکی‌های مرکز کانال که تغییرات فشار کل زیاد است فاصله‌ها را ۲ میلیمتر انتخاب کنید.

محاسبات

۱- منحنی‌های نیروی مقاوم برای هر سه جسم را بر روی یک صفحه بر حسب فشار دینامیکی $(\frac{1}{2}\rho U^2)$ رسم نمایید و روی آنها بحث کنید.

۲- برای استوانه منحنی ضریب نیروی مقاوم C_D را بر حسب فشار دینامیکی رسم کنید.

(برای استوانه $d = ۱۲/۵\ \text{mm}$ قطر $l = ۴۸\ \text{mm}$ طول)

۳- توزیع فشار P و ضریب فشار C_P و $C_{\text{P}}\ \cos\theta$ را برحسب θ رسم کنید.

۴- منحنی تغییرات نسبت سرعت $\frac{u}{U}$ و کمیت $(۱-\frac{u^۲}{U^۲})$ را با استفاده از نتایج آزمایش روش (ج) برای پشت سر استوانه رسم کنید.

۵- با استفاده از نتایج آزمایشات ب و ج ضریب نیروی مقاوم C_D را به دست آورده و با مقدار به دست آمده از اندازه‌گیری مستقیم مقایسه کنید و علت اختلاف را شرح دهید.

سئوالات تکمیلی

۱- آیا می توان از طریق رسم توزیع فشار، ضریب نیروی مقاوم را برای صفحات مسطح و ایرفویل به دست آورد؟