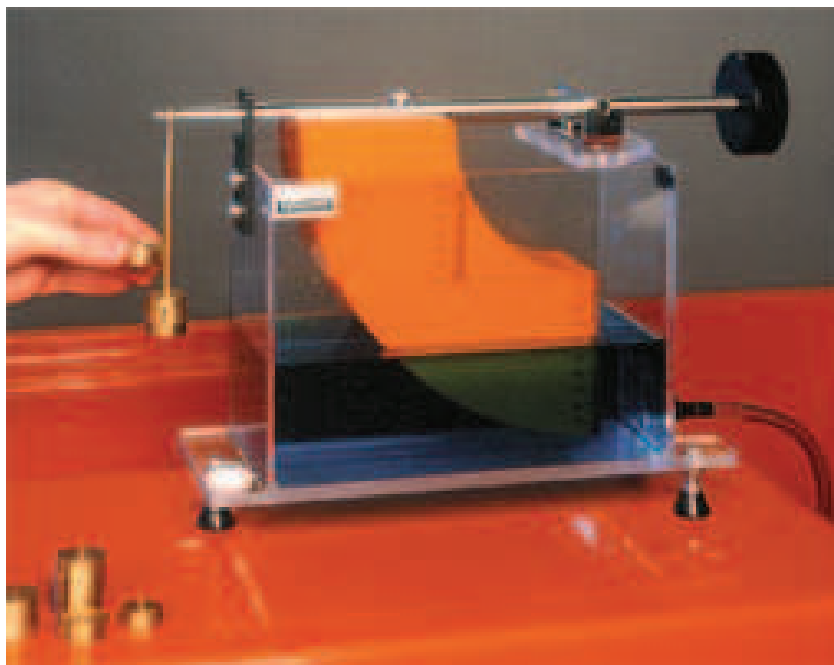




دانشگاه شهید چمران اهواز

گروه مهندسی مکانیک

آزمایشگاه مکانیک سیالات



دکتر مرتضی بهبهانی نژاد

مهندس علیرضا دنده دزفولی

پائیز ۱۳۸۶

فهرست مطالب

۱	مقدمه	۱
۱.۱	مقررات و نحوه ارزیابی دانشجو	۱
۲.۱	گزارشات، نحوه نگارش و ارزیابی آنها	۲
۱.۲.۱	گزارش مختصر	۲
۲.۲.۱	گزارش کامل	۳
۳.۲.۱	ارزیابی گزارشات آزمایشگاه	۴
۳.۱	کلیاتی از آزمایشات مورد نظر	۵
۱.۳.۱	آزمایشات مورد نظر	۵
۲.۳.۱	ترتیب انجام آزمایشات	۷
۲	اندازه گیری سرعت به کمک لوله ی پیتوت	۸
۱.۲	هدف	۸
۲.۲	تئوری آزمایش	۸
۳.۲	شرح دستگاه	۱۰
۴.۲	روش انجام آزمایش	۱۳
۵.۲	نتایج و محاسبات	۱۵
۳	آزمایش استاتیک سیالات	۱۶
۱.۳	هدف	۱۶
۲.۳	تئوری آزمایش	۱۶
۱.۲.۳	آزمایش غوطه وری	۱۶
۲.۲.۳	آزمایش کالیبراسیون فشارسنج	۱۹
۳.۳	شرح دستگاه	۲۰
۴.۳	روش انجام آزمایش	۲۲
۱.۴.۳	آزمایش غوطه وری	۲۲

۲۳.....	آزمایش کالیراسیون.....	۲.۴.۳
۲۳.....	نتایج و محاسبات.....	۵.۳
۲۵.....	خواسته‌های آزمایش.....	۶.۳
۲۷.....	آزمایش افت اصطکاکی در لوله مستقیم.....	۴
۲۷.....	هدف.....	۱.۴
۲۷.....	تئوری آزمایش.....	۲.۴
۳۰.....	شرح دستگاه.....	۳.۴
۳۳.....	روش انجام آزمایش.....	۴.۴
۳۶.....	نتایج و محاسبات.....	۵.۴
۳۸.....	خواسته‌های آزمایش.....	۶.۴
۳۹.....	افت فشار موضعی در اتصالات.....	۵
۳۹.....	هدف.....	۱.۵
۳۹.....	تئوری آزمایش.....	۲.۵
۴۳.....	شرح دستگاه.....	۳.۵
۴۴.....	روش انجام آزمایش.....	۴.۵
۴۵.....	نتایج و محاسبات.....	۵.۵
۴۵.....	خواسته‌های آزمایش.....	۶.۵
۴۷.....	افت فشار موضعی در شیرآلات.....	۶
۴۷.....	هدف.....	۱.۶
۴۷.....	تئوری آزمایش.....	۲.۶
۴۸.....	شرح دستگاه.....	۳.۶
۵۰.....	روش انجام آزمایش.....	۴.۶
۵۰.....	نتایج و محاسبات.....	۵.۶
۵۱.....	خواسته‌های آزمایش.....	۶.۶

۷	پرش هیدرولیکی	۵۲
۱.۷	هدف	۵۲
۲.۷	تئوری آزمایش	۵۲
۳.۷	شرح دستگاه	۵۵
۴.۷	روش انجام آزمایش	۵۶
۵.۷	خواسته‌های آزمایش	۵۷
۸	اندازه‌گیری پروفیل سرعت و ضریب فشار بر روی استوانه در تونل باد	۵۸
۱.۸	هدف	۵۸
۲.۸	تئوری آزمایش	۵۸
۳.۸	شرح دستگاه	۶۱
۴.۸	روش انجام آزمایش	۶۶
۵.۸	نتایج و محاسبات	۶۹
۶.۸	خواسته‌های آزمایش	۶۹
۹	اندازه‌گیری ضریب درگ اجسام مختلف در تونل باد	۷۰
۱.۹	هدف	۷۰
۲.۹	تئوری آزمایش	۷۰
۳.۹	شرح دستگاه	۷۵
۴.۹	روش انجام آزمایش	۷۸
۵.۹	نتایج و محاسبات	۷۹
۶.۹	خواسته‌های آزمایش	۷۹
۱۰	آزمایش منحنی مشخصه پمپ سانتریفوژ	۸۱
۱.۱۰	هدف	۸۱
۲.۱۰	تئوری آزمایش	۸۱
۳.۱۰	شرح دستگاه	۸۴

۹۱.....	روش انجام آزمایش	۴.۱۰
۹۳.....	نتایج و محاسبات	۵.۱۰
۹۳.....	خواسته‌های آزمایش	۶.۱۰

فهرست شکل‌ها

- شکل ۱.۲: نمایش سطح انرژی کل جریان و سطح هد استاتیکی و چگونگی قرارگیری آن‌ها نسبت به یکدیگر..... ۹
- شکل ۲.۲: نمایش موقعیت قرارگرفتن پیزومتر..... ۱۱
- شکل ۳.۲: نمایش لوله پیتوت آزمایش..... ۱۱
- شکل ۴.۲: نمایش دبی سنج..... ۱۲
- شکل ۵.۲: نمایش چگونگی تغییرات ارتفاع کف کانال..... ۱۲
- شکل ۶.۲: نمایش BED ELEVATOR..... ۱۲
- شکل ۷.۲: نمایش دستگاه اندازه‌گیری سرعت به کمک لوله پیتوت..... ۱۳
- شکل ۸.۲: نمایش سوئیچ روشن-خاموش دستگاه..... ۱۴
- شکل ۱.۳: نمایش صفحه صاف زاویه‌دار تحت فشار..... ۱۷
- شکل ۲.۳: غوطه‌وری جزئی..... ۱۸
- شکل ۳.۳: غوطه‌وری کامل..... ۱۹
- شکل ۴.۳: نمایش دستگاه آزمایش فشار هیدروستاتیکی..... ۲۰
- شکل ۵.۳: شکل شماتیک دستگاه آزمایش..... ۲۱
- شکل ۶.۳: شکل شماتیک فشارسنج بُردن..... ۲۱
- شکل ۱.۴: سطح انرژی سیال در طول حرکت سیال به دلیل افت‌های اصطکاکی کم می‌شود..... ۲۷
- شکل ۲.۴: نمایش تغییرات افت هد نسبت به انرژی جنبشی..... ۲۹
- شکل ۳.۴: دیاگرام مودی..... ۳۰
- شکل ۴.۴: نمایش دستگاه افت فشار..... ۳۱
- شکل ۵.۴: نمایش واحد اندازه‌گیری دبی در خروجی تابلو..... ۳۲
- شکل ۶.۴: نمایش چگونگی وضعیت شیر قرمز رنگ در مسیر (۱)..... ۳۴
- شکل ۷.۴: نمایش مانومتر بکار رفته در آزمایش..... ۳۴
- شکل ۸.۴: نمایش انواع لوله‌های مورد استفاده در دستگاه افت فشار..... ۳۵
- شکل ۹.۴: دیاگرام ویسکوزیته آب بر حسب دما در فشار یک اتمسفر..... ۳۷

- شکل ۱.۵: نمایش افت انرژی در یک انبساط ناگهانی..... ۴۰
- شکل ۲.۵: زنجیره‌های مختلف گاز طبیعی..... ۴۱
- شکل ۳.۵: دیاگرام تغییرات ضریب افت فشار در یک خم..... ۴۲
- شکل ۴.۵: نمایش فیلتر..... ۴۳
- شکل ۵.۵: نمایش بخش انبساط و انقباض ناگهانی..... ۴۴
- شکل ۱.۶: نمونه‌ای از شیر تویی..... ۴۹
- شکل ۲.۶: نمونه‌ای از شیر کشویی..... ۴۹
- شکل ۳.۶: نمونه‌ای از شیر فلکه..... ۴۹
- شکل ۱.۷: جریان از زیر یک دریچه‌ی کشویی، از حالت زیر بحرانی به بحرانی و سپس به جریان فوق بحرانی شتاب می‌گیرد و با یک پرش به جریان زیر بحرانی باز می‌گردد..... ۵۳
- شکل ۲.۷: طبقه‌بندی انواع پرش‌های هیدرولیکی..... ۵۴
- شکل ۳.۷: منحنی عمق بر حسب انرژی مخصوص نشان‌دهنده‌ی این است که حداقل انرژی در عمق بحرانی اتفاق می‌افتد..... ۵۵
- شکل ۴.۷: در پرش هیدرولیکی جریان از مافوق بحرانی به مادون بحرانی تبدیل می‌شود..... ۵۷
- شکل ۱.۸: فرم لوله پیتوت تونل باد..... ۵۹
- شکل ۲.۸: ماهیت لایه مرزی روی یک استوانه و جدایش آن..... ۵۹
- شکل ۳.۸: جریان یک سیال ایده‌آل روی یک استوانه..... ۶۰
- شکل ۴.۸: مقایسه‌ی تئوری سیال کامل و آزمایش برای توزیع فشار روی یک استوانه..... ۶۰
- شکل ۵.۸: نمایش واحد اندازه‌گیری ولتاژ تونل باد..... ۶۱
- شکل ۶.۸: نمایش مقطع لانه زنبوری در ورودی تونل باد..... ۶۲
- شکل ۷.۸: نمایش فن تونل باد..... ۶۳
- شکل ۸.۸: نمایش لوله پیتوت تونل باد..... ۶۴
- شکل ۹.۸: نمایش مانومتر ۲۰ لوله‌ای..... ۶۴
- شکل ۱۰.۸: استوانه مربوط به اندازه‌گیری توزیع فشار..... ۶۵
- شکل ۱۱.۸: نمایش تونل باد مادون صوت..... ۶۵
- شکل ۱.۹: صفحه‌ی عمود بر جهت جریان سیال..... ۷۱

- شکل ۲.۹: توزیع فشار روی کره در یک سیال ایده‌آل ۷۲
- شکل ۳.۹: توزیع فشار روی کره برای یک سیال نیوتنی $10^3 < Re < 10^5$ ۷۳
- شکل ۴.۹: ضریب C_D بر حسب عدد رینولدز برای کره ۷۴
- شکل ۵.۹: توزیع فشار روی کره برای یک سیال نیوتنی در $Re > 10^5$ ۷۴
- شکل ۶.۹: مدل‌های مورد آزمایش ۷۶
- شکل ۷.۹: قسمت بالانس دستگاه تونل باد ۷۷
- شکل ۱.۱۰: نمودار یک سیستم پمپ ۸۲
- شکل ۲.۱۰: نمونه‌ای از یک پمپ گریز از مرکز ۸۳
- شکل ۳.۱۰: توان ورودی پمپ گریز از مرکز توسط الکتروموتور تأمین می‌گردد. ۸۴
- شکل ۴.۱۰: با تغییر رئوستا می‌توان دور الکتروموتور را تنظیم نمود. ۸۵
- شکل ۵.۱۰: برای نمایش دور الکتروموتور از دورسنج استفاده می‌شود. ۸۵
- شکل ۶.۱۰: محور پمپ توسط کوپلینگ به شفت الکتروموتور متصل شده است. ۸۶
- شکل ۷.۱۰: سرریزها از جمله سازه‌هایی مکانیکی هستند که برای تعیین دبی بکار برده می‌شوند. .. ۸۶
- شکل ۸.۱۰: نمایی از مخزن اصلی ۸۷
- شکل ۹.۱۰: با استفاده از یک شیر توپی می‌توان دبی را در لوله‌ها تنظیم نمود. ۸۸
- شکل ۱۰.۱۰: نمایی از اریفیس بکار رفته در سیستم PIPING دستگاه پمپ گریز از مرکز. ۸۹
- شکل ۱۱.۱۰: سطح سنج مبین سطح آب عبوری از سرریز V شکل می‌باشد. ۹۰
- شکل ۱۲.۱۰: به جهت نشان دادن فشار در هریک از مقاطع انتهایی پمپ از فشارسنج‌های بُردن استفاده می‌شود. ۹۰
- شکل ۱۳.۱۰: با بستن شیرهای روی سیستم لوله‌ای بین دو پمپ تنها پمپ (۱) در مدار باقی خواهد ماند. ۹۱
- شکل ۱۴.۱۰: در شکل بالا فشارسنج سمت راست فشار سیال ورودی و فشارسنج سمت چپ فشار سیال خروجی را در پمپ نشان می‌دهد. ۹۲

۱ مقدمه

در این فصل در ابتدا مقررات و نحوه ارزیابی دانشجوی در آزمایشگاه مکانیک سیالات تشریح می‌شود. پس از آن گزارشات مربوط به آزمایشگاه اعم از گزارش‌های مختصر و کامل و چگونگی تدوین آنها مورد بحث قرار می‌گیرد. در نهایت کلیاتی از آزمایشاتی که در این آزمایشگاه انجام خواهد شد، تشریح می‌شود.

۱.۱ مقررات و نحوه ارزیابی دانشجو

به منظور انجام هرچه بهتر آزمایشهای مورد نیاز مقررات زیر در آزمایشگاه مکانیک سیالات به اجرا گذاشته می‌شود:

- آزمایشگاه رأس ساعت مقرر مطابق با برنامه آموزشی دانشکده شروع و پس از دو ساعت خاتمه می‌یابد.
- در اولین جلسه دانشجویان به گروههای سه الی چهار نفری تقسیم و در طول ترم تحصیلی آزمایشات را بصورت گروهی انجام می‌دهند.
- هرگروه لازم است پس از انجام آزمایش گزارش کوتاه آزمایش را که فرمت آن در بخش بعدی تشریح می‌شود تهیه و قبل از ترک آزمایشگاه به مسئول مربوطه تحویل نماید.
- هر گروه لازم است حداکثر تا یک هفته پس از انجام آزمایش، گزارش کامل آنرا که فرمت آن در بخش بعدی معرفی می‌شود، تهیه و به مسئول آزمایشگاه ارائه نماید.
- تاخیر حضور در آزمایشگاه بیش از نیم ساعت به منزله غیبت تلقی خواهد شد.

- چنانچه دانشجو در هرکدام از جلسات آزمایشگاه غیبت داشته باشد، برای آزمایش مربوطه نمره صفر در نظر گرفته خواهد شد.
 - برای حضور منظم و به موقع دانشجو در آزمایشگاه ۱۰ درصد نمره اختصاص یافته است. بدیهی است متناسب با تاخیر دانشجو میزان این نمره کاهش خواهد یافت.
 - هرگروه لازم است قبل از ترک آزمایشگاه از آزمایش هفته بعدی خود مطلع شده و دستور کار آزمایش مربوطه را در این مدت مطالعه نماید.
- نمره آزمایشگاه مکانیک سیالات براساس ۱۰۰ نمره به شکل زیر در نظر گرفته شده است:

جدول ۱.۱: بارم‌بندی نمره آزمایشگاه مکانیک سیالات

نمره از ۱۰۰	
۴۰ نمره	تدوین گزارشات
۵۰ نمره	آزمون نهائی
۱۰ نمره	حضور به موقع

۲.۱ گزارشات، نحوه نگارش و ارزیابی آنها

هرگروه موظف است برای هرکدام از آزمایشات یک گزارش مختصر و یک گزارش کامل ارائه نماید. فرمت گزارشهای مربوطه به قرار زیر است.

۱.۲.۱ گزارش مختصر

گزارش کوتاه باید حین انجام آزمایش تهیه شده و پس از انجام آزمایش بصورت پاکنویس شده قبل از ترک آزمایشگاه به مسئول مربوطه تحویل داده شود. این گزارش شامل موارد زیر می‌باشد:

- مشخصات کلی

شامل عنوان آزمایش، نام و نام خانوادگی و شماره دانشجویی اعضای دسته مربوطه، تاریخ و ساعت انجام آزمایش، شماره دسته مربوطه

- هدف از انجام آزمایش مورد نظر

لازم است در قالب یک پاراگراف توضیح داده شود که آزمایش مورد نظر به چه منظور و با چه هدفی انجام شده است.

- نتایج بدست آمده

باید کلیه موارد اندازه‌گیری شده و اعداد و ارقام بدست آمده بعنوان نتایج آزمایش در جداولی منظم ارائه شود.

۲.۲.۱ گزارش کامل

کلیه گزارشات مورد نیاز لازم است مطابق با فرمت یکسانی که در ادامه تشریح می‌شود تهیه و ارائه شوند. گزارش تهیه شده باید بگونه‌ای باشد که هر شخص ثالثی در رشته مورد نظر بتواند با مطالعه آن آزمایش را تکرار کرده و نتایج گزارش را استخراج نماید. گزارش کامل باید شامل موارد زیر باشد:

- صفحه عنوان

صفحه عنوان باید مطابق با نمونه ارائه شده در پیوست این گزارش تهیه شده و بعنوان اولین صفحه گزارش کامل در نظر گرفته شود. نکته‌ای که حائز اهمیت است این است که باید درصد همکاری هرکدام از اعضای گروه در تهیه گزارش کامل مقابل نام و نام خانوادگی آنها درج شود. میزان درصد همکاری هرکدام از اعضا بعنوان معیاری از نمره گزارش کامل به فرد مربوطه در نظر گرفته می‌شود.

- فهرست مطالب

هر صفحه از گزارش باید شماره مربوط به خود را دارا بوده و فهرست مطالب براین اساس تنظیم شود.

- هدف از انجام آزمایش

از مهمترین بخشهای گزارش کامل، هدف از انجام آزمایش است تا خواننده با مطالعه آن دریابد که این آزمایش به چه منظور انجام می‌شود و چه اهدافی را دنبال می‌نماید.

- تئوری آزمایش

در این بخش کلیه روابط تئوری آزمایش مربوطه با توجه به مراجع موجود باید جمع‌آوری و ارائه شود. براساس روابط ارائه شده در این بخش باید نتایج تئوریک آزمایش مربوطه استخراج شود تا در بخش نتایج با نتایج بدست آمده از آزمایش مورد مقایسه قرار گیرد.

- روش انجام آزمایش

در این بخش باید دستگاه آزمایش و وسایل مربوطه در قالب شکل‌های شماتیک تشریح شوند و طرز کار با دستگاه و وسایل اندازه‌گیری توضیح داده شود. پس از آن روش انجام آزمایش بصورت مرحله به مرحله تشریح گردد.

- نتایج بدست آمده

متناسب با هرکدام از آزمایشها، نتایج خاصی لازم است توسط دانشجو ارائه شود. این نتایج براساس موارد اندازه‌گیری شده استخراج می‌شوند. در این بخش لازم است نمونه‌ای از محاسباتی که براساس آنها نتایج آزمایش بدست آمده است ارائه شود. پس از آن باید نتایج بدست آمده از آزمایش و تئوریک بصورت جدول و منحنی بگونه‌ای ارائه شوند که مقایسه آنها براحتی امکانپذیر باشد.

- بحث و نتیجه‌گیری

در این بخش باید در مورد صحت نتایج بدست آمده و خطاهایی که منجر به عدم تطابق نتایج شده است بحث و نتیجه‌گیری انجام شود.

۳.۲.۱ ارزیابی گزارشات آزمایشگاه

ارزیابی هرگزارش مطابق با زیر خواهد بود:

جدول ۲.۱: نحوه ارزیابی گزارشات آزمایشگاه مکانیک سیالات

۱۰	مرتب نویسی
۲۰	هدف، تئوری، شرح آزمایش
۲۰	نمونه محاسبات و بدست آوردن نتایج
۳۰	رسم منحنی ها و بحث و نتیجه گیری
۲۰	تحويل به موقع گزارش
۱۰۰	جمع کل

۳.۱ کلیاتی از آزمایشات موردنظر

در این بخش کلیاتی از انواع آزمایشاتی که در این آزمایشگاه انجام می شود، ارائه شده و پس از آن ترتیب انجام این آزمایشات مورد بحث قرار می گیرد.

۱.۳.۱ آزمایشات مورد نظر

در این آزمایشگاه تعداد نه آزمایش به شرح زیر انجام می شود:

۱. اندازه گیری سرعت به کمک لوله ی پیتوت

هدف از این آزمایش اندازه گیری سرعت به صورت تجربی در نقاط مختلف یک مقطع از جریان داخل یک مجرا و مطالعه پروفیل مربوطه می باشد. با تعیین پروفیل سرعت برای یک مقطع، سرعت متوسط قابل محاسبه است. در نهایت می توان با استفاده از پروفیل سرعت، دبی جریان را بدست آورده و با مقدار ارائه شده توسط دبی سنج مقایسه نمود.

۲. آزمایش استاتیک سیالات

هدف از انجام این آزمایش بررسی رفتار یک سیال ساکن در ارتباط با غوطه وری اجسام در آن و همچنین تحت فشار قرارگرفتن آن در یک ظرف بسته و تحقیق قانون پاسکال می باشد.

۳. آزمایش افت اصطکاکی در لوله مستقیم

هدف از این آزمایش بررسی قوانین موجود در مورد مقاومت اصطکاکی در مقابل حرکت سیال در داخل لوله با زبری مختلف بر حسب نوع جریان می باشد. همچنین می توان توسط معادله ی پواسلی برای جریان آرام (لایه ای) ضریب ویسکوزیته و توسط رابطه ی داری- وایسباخ ضریب اصطکاک را تعیین نمود.

۴. آزمایش افت انرژی موضعی در اتصالات

هدف از آزمایش تعیین افت انرژی ناشی از اجزاء یک سیستم لوله کشی (مانند: زانویی، شیر، تغییر ناگهانی مقطع لوله و خم) و رابطه ی بین افت انرژی و سرعت می باشد. همچنین ضریب افت انرژی برای اتصالات مختلف تعیین می شود.

۵. افت انرژی موضعی در شیرآلات

هدف از آزمایش تعیین افت انرژی اجزایی از یک سیستم لوله کشی بنام شیرها و رابطه ی بین افت انرژی و سرعت جریان می باشد. همچنین ضریب افت انرژی برای شیرآلات مختلف بدست می آید.

۶. پرش هیدرولیکی

در این آزمایش پدیده پرش هیدرولیکی در کانال های باز مورد مطالعه قرار می گیرد.

۷. اندازه گیری پروفیل سرعت و ضریب فشار بر روی استوانه در تونل باد

در این آزمایش هدف بدست آوردن سرعت در مقطع آزمایش یک تونل باد برای مقادیر مختلف سرعت جریان و همچنین اندازه گیری توزیع فشار و تعیین ضریب فشار بر روی سطح یک استوانه می باشد.

۸. اندازه گیری ضریب درگ اجسام مختلف در تونل باد

در این آزمایش هدف بدست آوردن ضریب درگ اجسام مختلف در تونل باد برای مقادیر مختلف سرعت جریان می باشد.

۹. آزمایش پمپ گریز از مرکز

بررسی عملکرد پمپ گریز از مرکز در دورهای ثابت و دبی‌های متغیر، اندازه‌گیری هد، رسم منحنی‌های مشخصه پمپ و تعیین نقطه بهینه.

۲.۳.۱ ترتیب انجام آزمایشات

هر دسته در طی نه هفته آزمایشگاه مکانیک سیالات، آزمایشات را به ترتیب شماره‌ی آزمایش نامبرده در بخش قبلی و جدول زمان‌بندی شده زیر انجام خواهد داد.

جدول ۳.۱: زمان‌بندی ترتیب آزمایشات بر اساس شماره‌ی آزمایش

دسته (۳)	دسته (۲)	دسته (۱)	هفته
۳	۲	۱	اول
۲	۱	۳	دوم
۱	۳	۲	سوم
۷	۶	۴	چهارم
۶	۴	۷	پنجم
۴	۷	۶	ششم
۹	۸	۵	هفتم
۸	۵	۹	هشتم
۵	۹	۸	نهم

۲ اندازه‌گیری سرعت به کمک لوله‌ی پیتوت

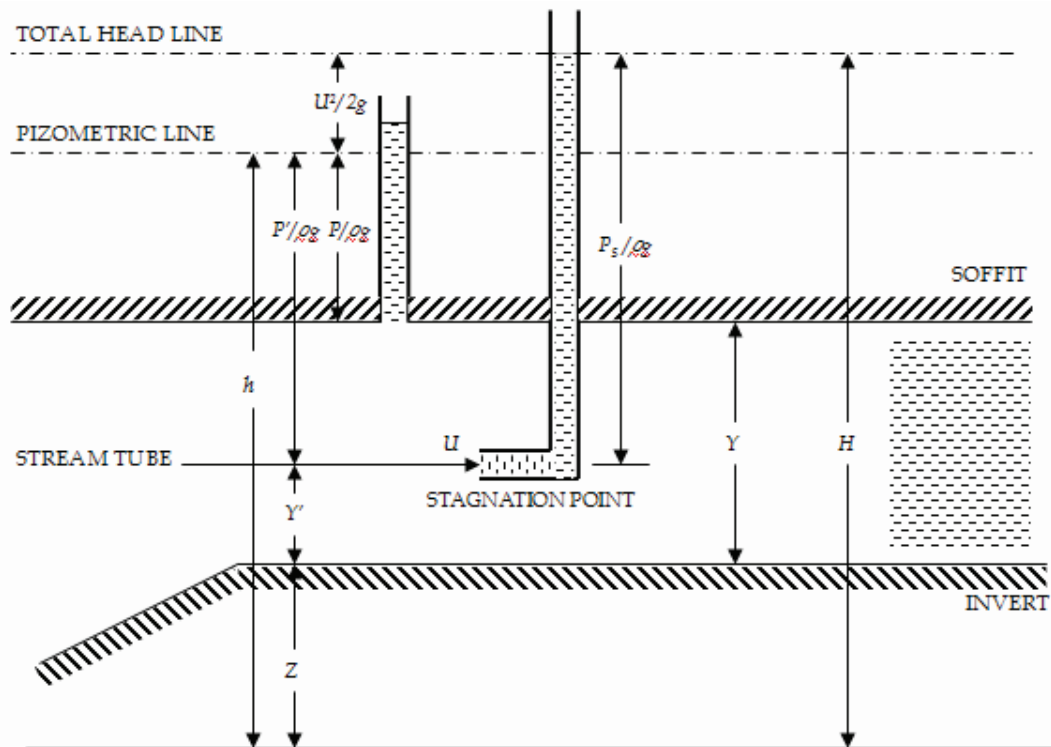
۱.۲ هدف

هدف از این آزمایش اندازه‌گیری سرعت به صورت تجربی در نقاط مختلف یک مقطع از جریان داخل یک مجرا و مطالعه پروفیل مربوطه می‌باشد. با تعیین پروفیل سرعت برای یک مقطع، سرعت متوسط قابل محاسبه است. در نهایت می‌توان با استفاده از پروفیل سرعت، دبی جریان را بدست آورده و با مقدار ارائه شده توسط دبی‌سنج مقایسه نمود.

۲.۲ تئوری آزمایش

در شکل ۱.۲ نحوه جریان آب درون یک مجرا نشان داده شده است و سرعت آن در هر نقطه از مقطع جریان قابل اندازه‌گیری است. اگر حفره‌ای که در مجاورت سقف قرار دارد هیچ‌گونه تغییر جریانی در کنار آن اتفاق نیفتد، ستون آب $\frac{P}{\rho g}$ نشان دهنده ارتفاع فشار استاتیک مربوط به لوله‌ی جریانی است که در مجاورت حفره قرار دارد. علاوه بر این اگر همه‌ی لوله‌های جریان در جریان داخل مجرا موازی باشند، توزیع فشار در داخل مجرا بصورت هیدروستاتیک خواهد بود. بنابراین ارتفاع فشار استاتیک یعنی $\frac{P'}{\rho g}$ ، مربوط به لوله‌ی جریانی که به ارتفاع y' بالاتر بستر قرار دارد با ستون پیزومتر به صورت زیر رابطه دارد:

$$\frac{P'}{\rho g} = \frac{P}{\rho g} + (y - y') \quad (۱.۲)$$



شکل ۱.۲: نمایش سطح انرژی کل جریان و سطح هد استاتیکی و چگونگی قرارگیری آن‌ها نسبت به یکدیگر انرژی متناظر برابر مجموع انرژی‌های پتانسیل و جنبشی می‌باشد که برای یک لوله‌ی جریان است. یک شکل از معادله‌ی برنولی که مجموع این جملات انرژی را بیان می‌کند عبارتست از:

$$H = \frac{P'}{\rho g} + (y' + z) + \frac{u^2}{2g} \quad (۲.۲)$$

هر یک از جملات رابطه‌ی (۲.۲) شکلی از ارتفاع است که همگی دارای واحد طول هستند. بنابراین H بعنوان ارتفاع کلی تعریف می‌شود و $\frac{P'}{\rho g}$ ارتفاع متناظر با فشار، $(y' + z)$ ارتفاع متناظر با انرژی پتانسیل و $\frac{u^2}{2g}$ ارتفاع متناظر با انرژی جنبشی هستند. مجموع ارتفاع فشار و انرژی پتانسیل، ارتفاع پیزومتری نامیده می‌شود.

در نزدیکی قسمت افقی لوله‌ی پیتوت جریان در امتداد لوله جریان لحظه به لحظه آرام‌تر می‌شود تا جایی که به نقطه سکون^۱ می‌رسد. فشار استاتیک موضعی در این نقطه فشار سکون نامیده می‌شود (P_s) و فشار کلی اندازه‌گیری شده به وسیله‌ی لوله پیتوت به صورت زیر است:

^۱ - Stagnation point

$$H = \frac{P_s}{\rho g} + (y' + z) \quad (۳.۲)$$

با فرض این که هیچگونه اتلافی در طول لوله‌ی جریان وجود نداشته باشد معادله‌ی برنولی به صورت زیر بیان می‌شود:

$$\frac{P'}{\rho g} + (y' + z) + \frac{u^2}{2g} = \frac{P_s}{\rho g} + (y + z) \quad (۴.۲)$$

و یا:

$$H = h + \frac{u^2}{2g} \quad (۵.۲)$$

و

$$u = \sqrt{2g(H - h)} \quad (۶.۲)$$

در جریان واقعی سیال، سرعت و ارتفاع کلی برای یک مقطع مجرا ثابت نیستند، اما باز هم لوله‌ی پیتوت می‌تواند به طور رضایت‌بخشی برای اندازه‌گیری سرعت، مورد استفاده قرار گیرد.

۳.۲ شرح دستگاه

دستگاه آزمایش تشکیل شده است از یک کانال که در دو طرف آن، دو مخزن ورودی و خروجی وجود دارد. مخزن اصلی و پمپ در قسمت زیر میز دستگاه قرار داده شده‌اند، در وسط مقطع کانال مطابق با شکل ۲.۲، یک لوله پیزومتریک وجود دارد و یک لوله‌ی پیتوت (شکل ۳.۲) نیز می‌تواند به درون جریان وارد شود.

روی میز دستگاه یک دبی سنج الکتریکی نصب گردیده است که صفحه‌ی آن از صفر تا ۱۰۰ لیتر بر دقیقه مدرج گردیده است (شکل ۴.۲). همچنین یک شیر برای تخلیه^۲ آب از کانال و یک شیر برای تنظیم مقدار دبی ورودی^۳ وجود دارد. بستر کف کانال را بوسیله‌ی یک دسته‌ی قابل

^۲ -Discharge flow

^۳ -Inlet flow

چرخش بنام BED ELEVATOR، می‌توان در ارتفاع‌های مختلف مانند شکل ۵.۲ تنظیم نمود. شکل ۶.۲ نمایشی از شیرهای تنظیم دبی و تخلیه آب و BED ELEVATOR می‌باشد. نمونه‌ای از دستگاه آزمایش اندازه‌گیری سرعت به کمک لوله پیتوت در شکل ۷.۲ نشان داده شده است.



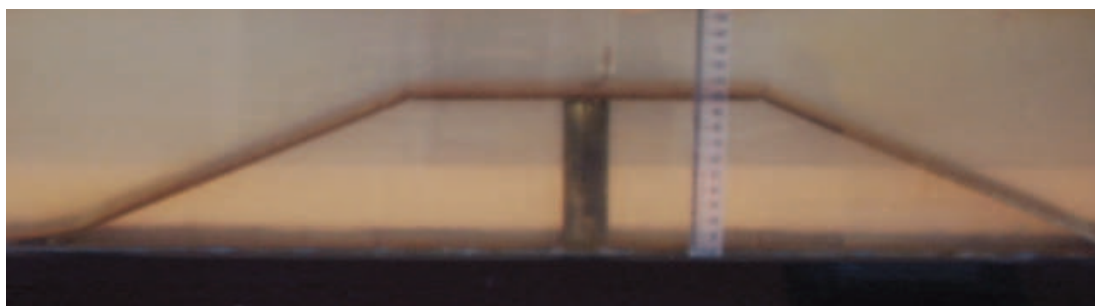
شکل ۲.۲: نمایش موقعیت قرارگرفتن پیزومتر



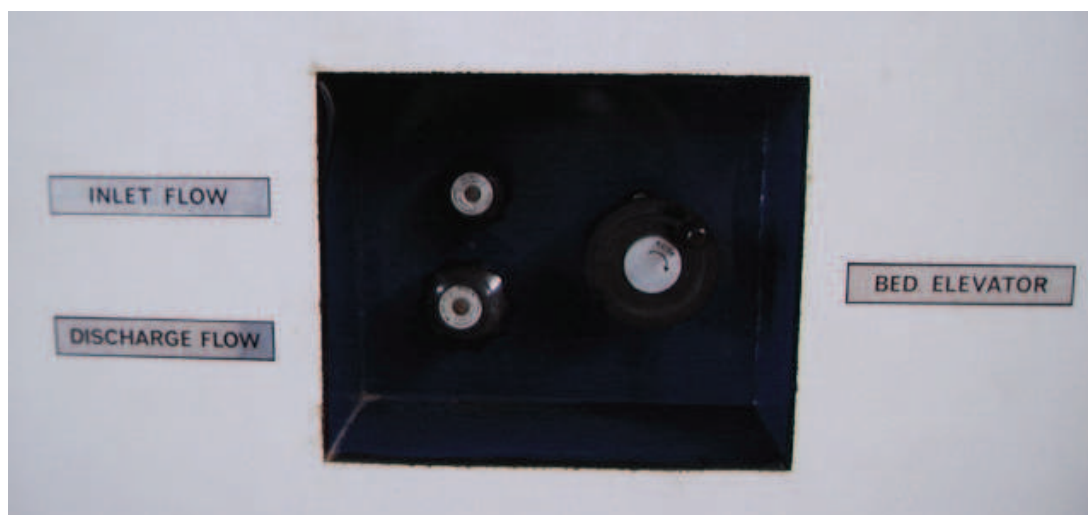
شکل ۳.۲: نمایش لوله پیتوت آزمایش



شکل ۴.۲: نمایش دبی سنج



شکل ۵.۲: نمایش چگونگی تغییرات ارتفاع کف کانال



شکل ۶.۲: نمایش BED ELEVATOR



شکل ۷.۲: نمایش دستگاه اندازه‌گیری سرعت به کمک لوله پیتوت

۴.۲ روش انجام آزمایش

۱. شیر خروجی را کاملاً باز نمایید و دریچه‌ی مخزن خروجی را پایین آورید.
۲. بستر مجرا را تا $Z = 100 \text{ mm}$ بالا ببرید.
۳. دستگاه را توسط سویچ روشن-خاموش (شکل ۸.۲) تعبیه شده بر روی دستگاه روشن نمایید.
۴. با تنظیم شیر ورودی دبی آب را روی مقدار 60 Lit/min تنظیم نمایید.
۵. با تنظیم شیر خروجی سطح آب را تقریباً در 75 mm بالای سقف مقطع عبوری تنظیم کنید.

۶. مقدار $\frac{u^2}{2g}$ را برای نقاطی به فواصل 5 mm از هم اندازه‌گیری کنید و جدول ۱.۲ را پر نمایید.



شکل ۸.۲: نمایش سوئیچ روشن-خاموش دستگاه

جدول ۱.۲: جدول ثبت داده‌های خوانده شده از روی لوله پیتوت و پیزومتر

$Z = \dots\dots\dots \text{mm}, \quad Q = \dots\dots\dots \text{Lit/min}$	
$y' \text{ (mm)}$	
h	
H	
$\frac{u^2}{2g} \text{ (mm)}$	

۷. با تغییر Q ، آزمایش را برای مقادیر 75 Lit/min و 90 Lit/min تکرار نمایید.

۸. Z را به اندازه‌ی 25 mm تغییر دهید و مراحل (۵) و (۶) و (۷) را تکرار کنید. آزمایش برای مقادیر $75 \text{ mm} \leq Z \leq 125 \text{ mm}$ انجام شود.

۵.۲ نتایج و محاسبات

۹. با استفاده از مقادیر سرعت در نقاط مختلف مقطع (۲) کانال، سرعت متوسط $\bar{u}$ را محاسبه نمایید و با مقدار $\bar{u}' = \frac{Q}{A}$ مقایسه کنید.

۱۰. علت اختلاف بین $\bar{u}$ تجربی و $\bar{u}'$ محاسبه شده چیست؟

۱۱. برای $Z = 100 \text{ mm}$ در دبی‌های مختلف پروفیل سرعت را ترسیم نمایید و علت اختلاف آن‌ها را بنویسید.

۳ آزمایش استاتیک سیالات

۱.۳ هدف

هدف از انجام این آزمایش بررسی رفتار یک سیال ساکن در ارتباط با غوطه‌وری اجسام در آن و همچنین تحت فشار قرارگرفتن آن در یک ظرف بسته و تحقیق قانون پاسکال می‌باشد.

۲.۳ تئوری آزمایش

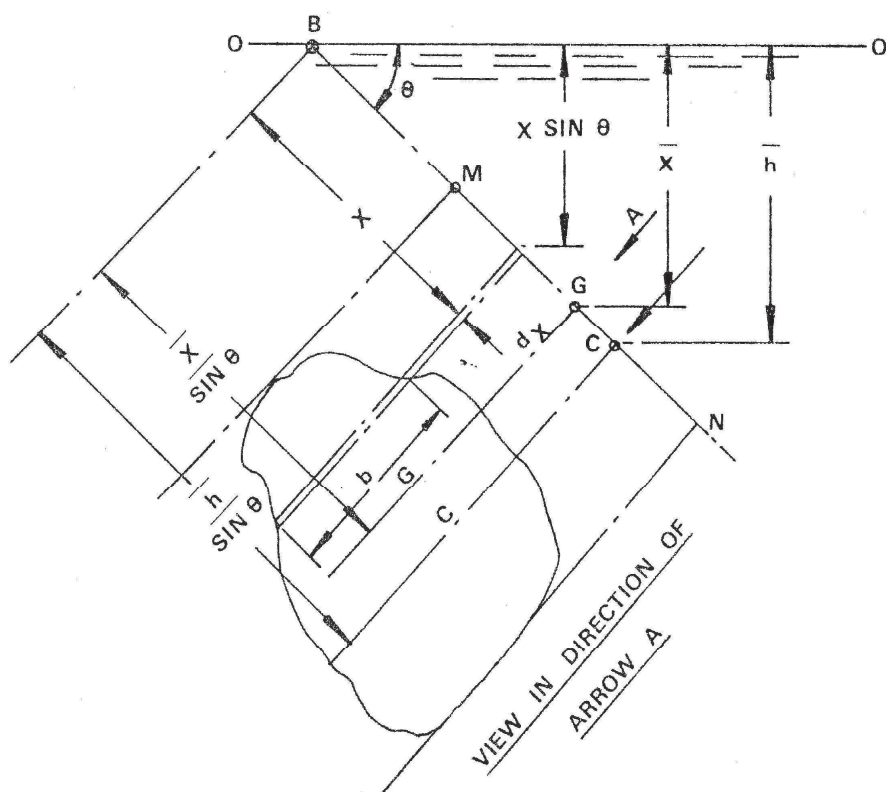
این آزمایش به دو بخش آزمایش غوطه‌وری و آزمایش کالیبراسیون فشارسنج تقسیم می‌شود. در آزمایش غوطه‌وری رفتار سیال ساکن در ارتباط با غوطه‌ورشدن اجسام در آن و در آزمایش کالیبراسیون فشارسنج، رفتار سیال ساکن در یک ظرف بسته تحت فشار مورد مطالعه قرار می‌گیرد.

۱.۲.۳ آزمایش غوطه‌وری

در ارتباط با بحث رفتار سیال در مورد غوطه‌وری جزئی و کامل داریم که در یک سیال ساکن نیروی وارد بر هر المان سطح dA یعنی dF عمود بر آن سطح است، اگر چنین نیرویی بر یک سطح صاف وارد شود کلیه نیروهای وارد بر سطح با هم موازیند و در نتیجه مقدار آن‌ها را می‌توان تنها با یک نیرو به نام نیروی برآیند که در نقطه‌ای به نام مرکز فشار اثر می‌کند نشان داد. در صورتی که سطح به صورت خمیده باشد وضع تفاوت می‌کند، بسته به طرق مختلف قرارگیری یک سطح دلخواه در یک سیال دو حالت زیر را در نظر می‌گیریم:

نمونه‌ای از این مدل سطح صافی است که بطور افقی در زیر سطح مایع قرار دارد. در این صورت نیروی وارد بر سطح برابر PA و یا ρghA می‌باشد که در آن A مساحت صفحه و h فاصله‌ی عمودی صفحه از سطح مایع است و محل اثر آن در مرکز سطح صفحه می‌باشد.

نمونه‌ای از این حالت صفحه‌ی صافی است که تحت زاویه‌ی دلخواهی در زیر سطح مایع قرار گرفته است. که در شکل ۱.۳ نشان داده شده است.



در این حالت مقدار نیروی عمود بر سطح برابر است با:

$$R = \rho q \bar{h} A \quad (1.3)$$

که در آن A سطح جسم و $\bar{h}$ فاصله‌ی قائم سطح آزاد تا مرکز سطح جسم است. محل اعمال این نیرو عبارتست از:

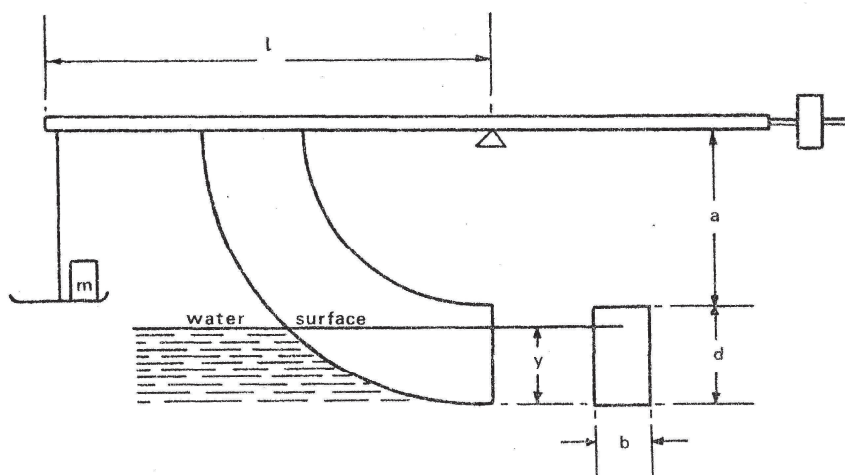
$$y_{cp} = \bar{y} + \frac{I_G}{A\bar{y}} \quad (۲.۳)$$

$$x_{cp} = \bar{x} + \frac{(I_{xy})_G}{A\bar{y}} \quad (۳.۳)$$

اگر شکل سطح نسبت به محور y ها تقارن داشته باشد I_{xy} صفر و در نتیجه $x_{cp} = \bar{x}$ است. همچنین در رابطه‌ی (۳.۳) مقدار $\frac{I_G}{A\bar{y}}$ همیشه مثبت است در نتیجه y_{cp} همیشه بزرگتر از $\bar{y}$ است یعنی مرکز فشار همیشه پایین‌تر از مرکز سطح قرار دارد. از آنجا که سطح مورد بررسی دارای تقارن نسبت به محور y ها است پس در رابطه‌ی (۳.۳) $I_{xy} = 0$ و امتداد مرکز فشار در راستای قائم منطبق بر راستای قائم مرکز سطح است.

برای حالت غوطه‌وری جزئی (شکل ۲.۳) مقدار $\bar{y}$ برابر $\frac{y}{2}$ و با گشتاورگیری حول لولای O خواهیم داشت:

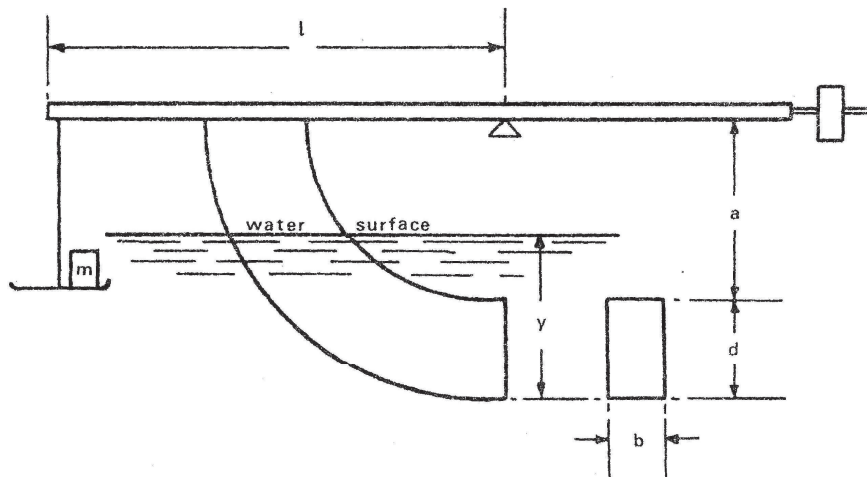
$$\frac{M}{y^2} = \frac{\rho b}{2l} \left(a + d - \frac{y}{3} \right) \quad (۴.۳)$$



شکل ۲.۳: غوطه‌وری جزئی

در حالت غوطه‌وری کامل (شکل ۳.۳) مقدار $\bar{y}$ برابر است با $y - \frac{d}{2}$ و با گشتاورگیری حول O خواهیم داشت:

$$\frac{M}{\bar{y}} = \frac{\rho b d}{l} \left(a + \frac{d}{2} + \frac{d^2}{12\bar{y}} \right) \quad (۵.۳)$$



شکل ۳.۳: غوطه‌وری کامل

۲.۲.۳ آزمایش کالیبراسیون فشارسنج

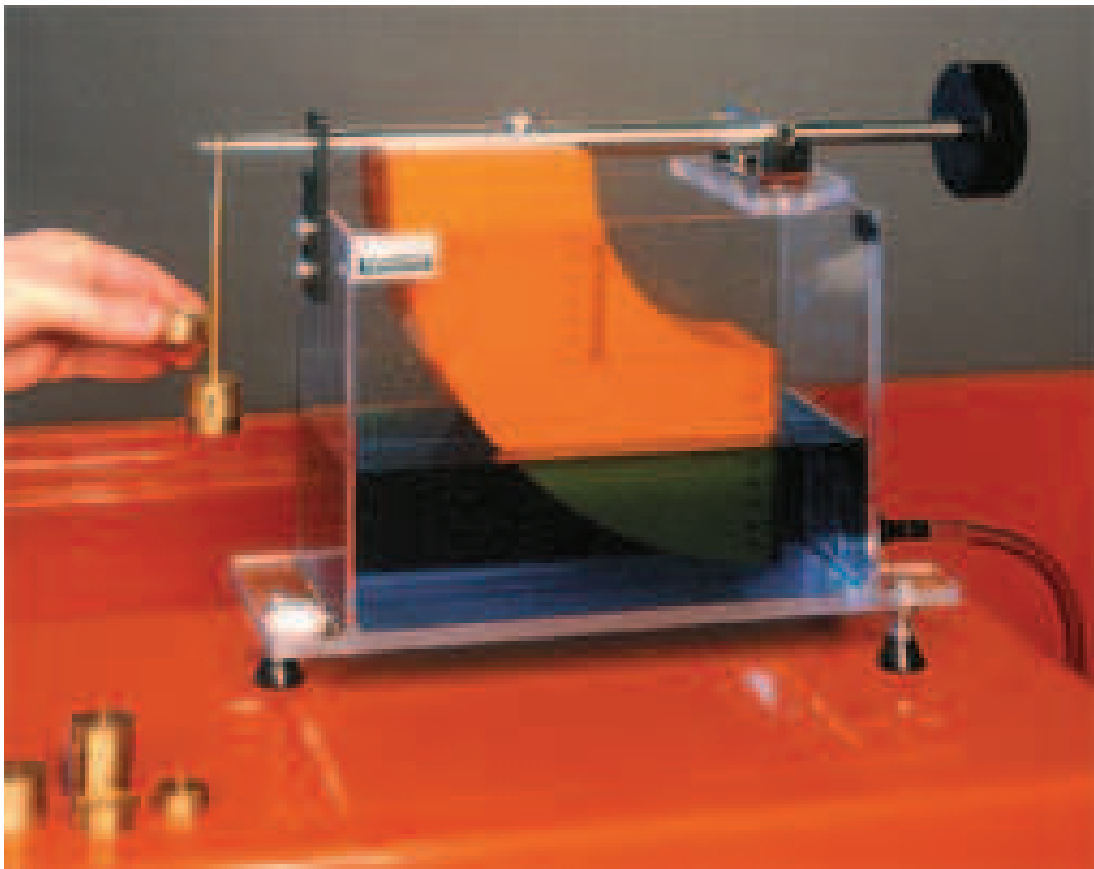
همچنین در ارتباط با سیال ساکن تحت فشار داریم که بر اساس قانون پاسکال، در یک سیال ساکن یکنواخت محصور، چنانچه فشار یک نقطه از آن را به اندازه dP افزایش دهیم، فشار تمام نقاط دیگر سیال نیز به اندازه dP افزایش خواهد یافت. فشار وارد بر سطح سیال یکنواخت برابر با نیروی وارد بر سطح تقسیم بر سطح در تماس سیال می‌باشد. این مطلب را از دیدگاه ریاضی به صورت زیر می‌توان بیان نمود:

$$P = \frac{F}{A} = \frac{mg}{A} \quad (۶.۳)$$

۳.۳ شرح دستگاه

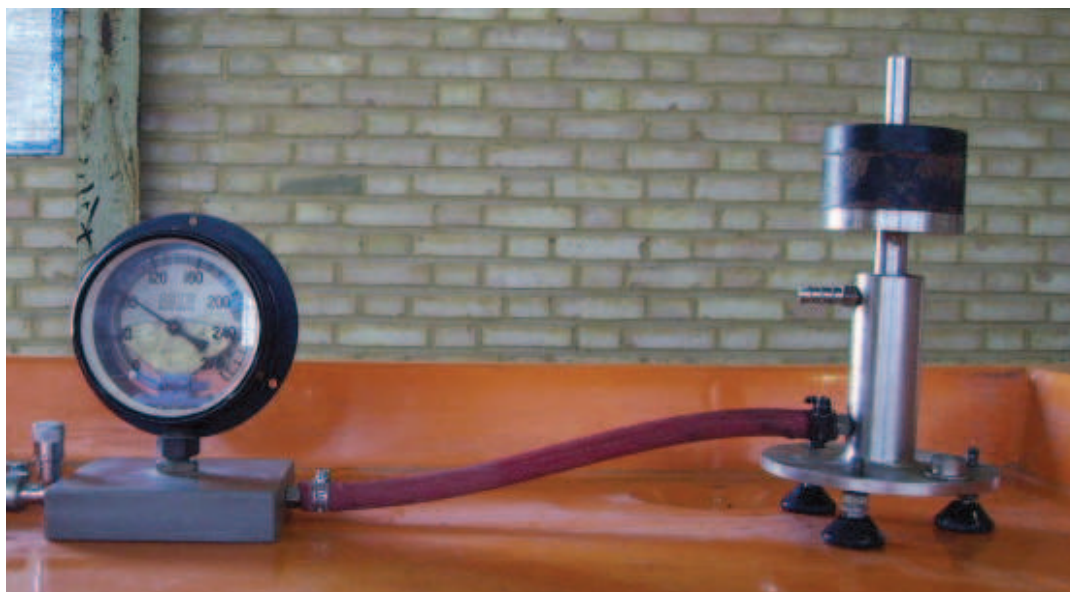
دستگاه مورد آزمایش از دو بخش دستگاه غوطه‌وری و سیستم فشارسنج بُردن تشکیل شده است. دستگاه غوطه‌وری از یک ظرف مکعب با سطوح جانبی شفاف و یک جسم معلق به شکل ربع دایره تشکیل شده است.

در مرکز جسم ربع دایره‌ای، مخزن بوسیله‌ی دو تیغه‌ی فلزی متصل به آن بر روی تکیه‌گاهی نصب شده است که جسم می‌تواند حول این تکیه‌گاه دوران نماید به محوری که دو تکیه‌گاه را به هم وصل می‌کند، بازویی وصل شده است و در انتهای بازو یک وزنه‌ی قابل تنظیم قرار دارد که برای تنظیم افقی دستگاه به کار می‌رود، همچنین در انتهای دیگر این بازو کفه‌ای آویزان است که با قرار دادن وزنه بر روی این کفه مقدار کوپل ایجاد شده توسط وزن آب موجود در مخزن حول تکیه‌گاه اندازه‌گیری می‌شود. ارتفاع آب h را بطور مستقیم می‌توان اندازه‌گیری نمود. در شکل ۴.۳ دستگاه آزمایش نشان داده شده است.

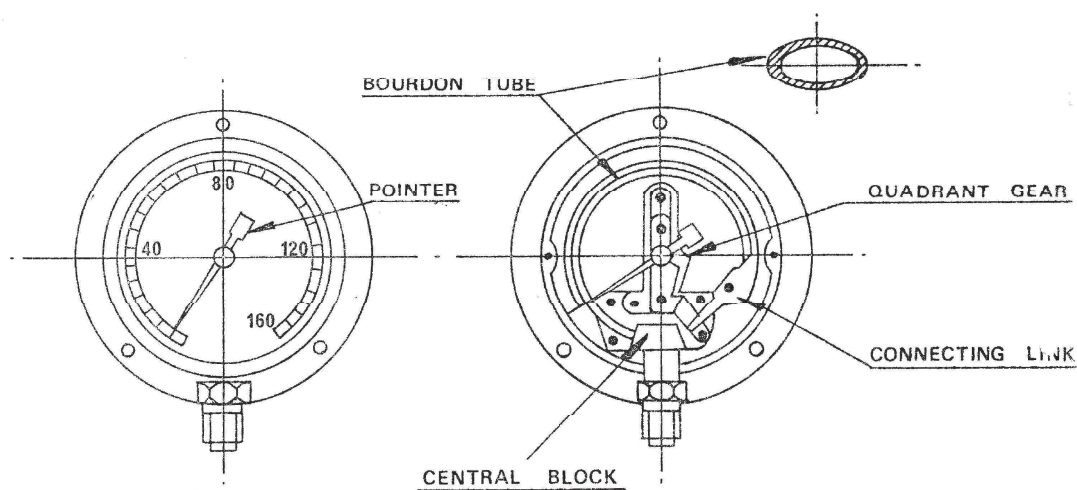


شکل ۴.۳: نمایش دستگاه آزمایش فشار هیدروستاتیکی

دستگاه فشارسنج بُردن از یک فشارسنج با نام فشارسنج بُردن و یک سیستم سیلندر و پیستون تشکیل شده است (شکل ۵.۳). شکل این نوع فشارسنج صنعتی در شکل ۶.۳ نشان داده شده است. با استفاده از این فشارسنج می‌توان فشارهایی بالاتر از فشار اتمسفر یا فشار مخازن را اندازه‌گیری کرد.



شکل ۵.۳: شکل شماتیک دستگاه آزمایش



شکل ۶.۳: شکل شماتیک فشارسنج بُردن

به هنگام بارگذاری یا باربرداری پیستون شناور، آب با عبور از یک لوله رابط وارد فشارسنج بُردن شده و در فشارسنج، آب وارد یک لوله با مقطع بیضوی می‌گردد و اهرم بین انتهای لوله و فنر فشارسنج را به حرکت در می‌آورد و این امر موجب متراکم شدن فنر فشارسنج و نمایش مقدار فشار وارد بر سطح آب بر روی صفحه مندرج شده روی فشارسنج می‌گردد.

۴.۳ روش انجام آزمایش

۱.۴.۳ آزمایش غوطه‌وری

۱. دقت کنید که ظرف در موقعیت افقی قرار داشته باشد.
۲. با تغییر موقعیت وزنه تعادل، شاخص را در موقعیت افقی قرار دهید.
۳. مقداری آب تا رسیدن به لبه پایینی جسم معلق در ظرف بریزید. با این کار سطح مبنای محور y را می‌توان تعیین نمود.
۴. ۵۵۰ گرم وزنه بر روی کفه بالانس قرار دهید و آنقدر آب در داخل ظرف بریزید تا شاخص مجدداً به حالت افقی برگردد. مقدار جرم و ارتفاع آب را یادداشت نمایید.
۵. مقدار جرم M را طبق جدول زیر کاهش دهید و با کاهش حجم آب از طریق شیر تخلیه سیستم را مجدداً متعادل و y را یادداشت کنید.

جدول ۱.۳: جدول مربوط به ثبت داده‌های خوانده شده از غوطه‌وری کامل

$M \text{ (gr)}$	۵۵۰	۴۵۰	۴۰۰	۳۵۰	۲۵۰
$y \text{ (cm)}$					

جدول ۲.۳: جدول مربوط به ثبت داده‌های خوانده شده از غوطه‌وری جزئی

$M \text{ (gr)}$	۱۷۵	۱۵۰	۱۲۵	۱۰۰	۵۰
$y \text{ (cm)}$					

۲.۴.۳ آزمایش کالیبراسیون

۱. دستگاه سیلندر و پیستون را با استفاده از تراز حباب‌دار روی سیلندر کاملاً به حالت تراز در بیاورید.
۲. سیلندر دستگاه را از آب پر کنید و پیستون شناور را روی آن قرار دهید.
۳. مقدار نشان داده شده توسط گیج را تنها با احتساب پیستون شناور بخوانید. به منظور جلوگیری از تماس پیستون با دیواره سیلندر، آن را در طول آزمایش دوران دهید.
۴. پیستون را با افزایش جرم $۰/۵$ کیلوگرم در هر مرحله بارگذاری کنید و هر بار مقدار فشار را بخوانید و در جدول ۵.۳ یادداشت کنید. توجه کنید که پیستون به حالت دوار نگه داشته شود.
۵. مرحله قبل را با کاهش جرم به مقدار $۰/۵$ کیلوگرم در هر مرحله تکرار کنید.
۶. در هر مرحله از بارگذاری و باربرداری، مقدار فشار تئوری را محاسبه کنید. سطح مقطع پیستون را می‌توان با اندازه‌گیری قطر پیستون توسط کولیس محاسبه نمود.

۵.۳ نتایج و محاسبات

۱. با استفاده از جدول ۱.۲، جدول ۳.۳ را تکمیل نمایید.

جدول ۳.۳: جدول مربوط به ثبت داده‌های نتیجه‌گیری شده از غوطه‌وری کامل

$M \text{ (gr)}$	$y \text{ (cm)}$	$\bar{y} = y - d/2$	$M/\bar{y}$	$1/\bar{y}$

۲. با استفاده از این جدول مقادیر $\frac{M}{y}$ را بر حسب $\frac{1}{y}$ رسم نمایید. شیب و عرض از مبدا این خط (منحنی تجربی) را تعیین و با مقادیری که از رابطه‌ی (۵.۳) بدست می‌آیند مقایسه کنید.

۳. با استفاده از جدول ۲.۳، جدول ۴.۳ را پر کنید.

جدول ۴.۳: جدول مربوط به ثبت داده‌های نتیجه گیری شده از غوطه‌وری جزئی

$M \text{ (gr)}$	$y \text{ (cm)}$	y^2	$\frac{M}{y^2}$

۴. با استفاده از این جدول مقادیر $\frac{M}{y^2}$ را بر حسب y رسم کنید. شیب و عرض از مبدا این خط را تعیین و با مقادیری از رابطه‌ی (۴.۳) بدست می‌آید، مقایسه کنید.

جرم وزن مرده پیستون = کیلوگرم

$$1 \text{ kg mass} = 0.4 \text{ bar} = 4.08 \text{ m of water}$$

جدول ۵.۳: جدول مربوط به یادداشت داده‌های مربوط به بارگذاری و باربرداری روی پیستون

وزن مرده دستگاه			بارگذاری		باربرداری		میزان خطا	
تئوری		$N=mg$	تجربی		تجربی		بارگذاری	باربرداری
			bar	m of water	bar	m of water	%	%

۶.۳ خواسته‌های آزمایش

۱. چرا در محاسبه‌ی گشتاور نیروهای وارده از طرف مایع بر جسم معلق حول نقطه O فقط نیروهای وارد بر سطح چهار گوش سمت راست در نظر گرفته شده است؟
۲. چرا مقدار $(I_{xy})_G$ برای سطحی که نسبت به محور y تقارن داشته باشد، صفر است؟
۳. نیروهای وارد بر هر کدام از سطوح را در حالت غوطه‌وری کامل به صورت پارامتری حساب کنید؟
۴. روابط (۴.۳) و (۵.۳) را اثبات کنید.
۵. ثابت کنید مرکز فشار در شکل ۲.۳ و شکل ۳.۳ به ترتیب از روابط (۷.۳) و (۸.۳) بدست می‌آیند. $(y, \bar{y})$ نسبت به سطح آب سنجیده می‌شوند.
۶. منحنی تغییرات مختصات مرکز فشار را نسبت به y برای دو حالت در یک صفحه رسم کنید.

$$y_{cp} = \frac{2}{3} \bar{y} \quad (۷.۳)$$

$$y_{cp} = \frac{6y^2 - 6yd + 2d^2}{6y - 3d} \quad (۸.۳)$$

۷. دانستن مرکز فشار در چه مواقعی مهم است و اهمیت آن چیست؟
۸. دو حالت معمول یک جسم نسبت به سیال عبارتند از: غوطه‌وری و شناوری. هر یک از حالات فوق را توضیح دهید و معین کنید جهت تعادل در هر حالت مرکز فشار نسبت به مرکز ثقل بایستی در وضعیتش باشد.
۹. بر روی یک دستگاه مختصات که محور افقی آن میزان جرم وزنه‌ها و محور عمودی آن فشار را بیان می‌کند، منحنی‌های تئوری و تجربی را در حالت بارگذاری و باربرداری رسم نمایید. با توجه به خطاهای موجود، در مورد عوامل ایجاد خطا بحث کنید.

۱۰. درصد خطا را برحسب میزان جرم وزنه‌ها ترسیم کنید. آیا میزان خطا هنگام بارگذاری و باربرداری یکسان است؟ چرا؟
۱۱. با توجه به این آزمایش، چه روشی را برای کالیبراسیون فشارسنج مربوطه پیشنهاد می‌کنید؟
۱۲. دلیل اینکه حین قرائت اعداد باید پیستون را دوران داد، چیست؟
۱۳. چه عواملی باعث می‌شود که یک فشارسنج از حالت کالیبره خارج شود؟
۱۴. سایر روش‌های کالیبراسیون فشارسنج‌ها را تشریح نمایید.

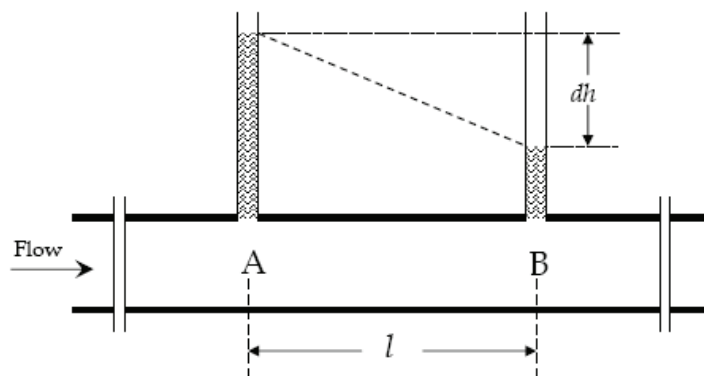
۴ آزمایش افت اصطکاکی در لوله مستقیم

۱.۴ هدف

هدف از این آزمایش بررسی قوانین موجود در مورد مقاومت اصطکاکی در مقابل حرکت سیال در داخل لوله با زبری مختلف بر حسب نوع جریان می‌باشد. همچنین می‌توان توسط معادله‌ی پواسلی برای جریان آرام (لایه‌ای) ضریب ویسکوزیته و توسط رابطه‌ی دارسی - ویسباخ ضریب اصطکاک را تعیین نمود.

۲.۴ تئوری آزمایش

افت انرژی در اثر اصطکاک در داخل یک لوله مستقیم به صورت کاهش فشار ظاهر می‌شود. اگر جریان مایعی از لوله‌ای همانند شکل ۱.۴ عبور کند اختلاف ارتفاع ایجادشده در مانومتری که به دو نقطه مختلف لوله وصل شده است، معرف افت انرژی در اثر اصطکاک یا افت فشار (به ازای واحد وزن سیال جاری) می‌باشد.



شکل ۱.۴: سطح انرژی سیال در طول حرکت سیال به دلیل افت‌های اصطکاکی کم می‌شود.

نظر به این که دیمانسیون افت فشار به ازاء واحد وزن سیال از جنس دیمانسیون طول است، به آن افت هد یا افت ارتفاع هم می‌گویند. در مسائل مهندسی معمولاً افت فشار را برای واحد طول لوله محاسبه می‌نمایند (رابطه (۱.۴)) و به آن گرادیان هیدرولیکی می‌گویند. گرادیان هیدرولیکی را معمولاً با i نمایش می‌دهند و عبارت است از:

$$i = \frac{\Delta h}{l} \quad (۱.۴)$$

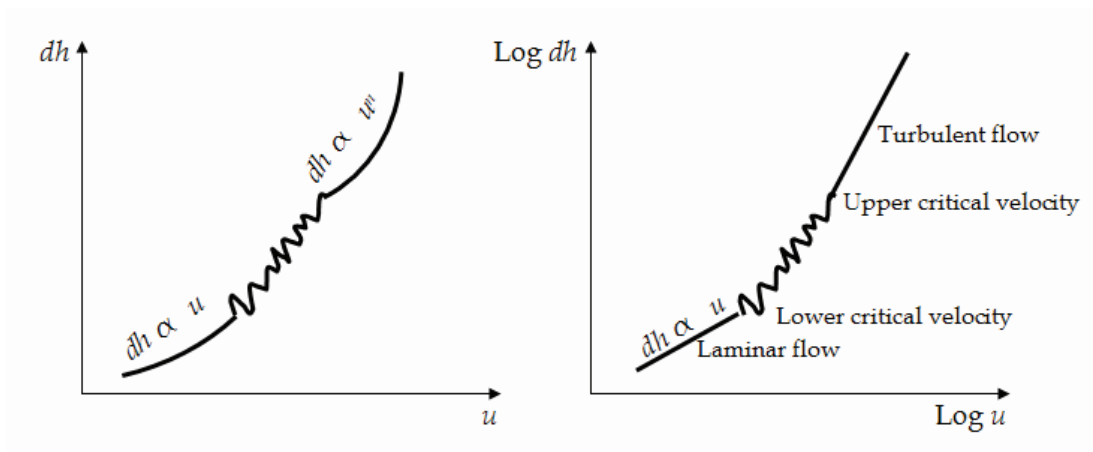
در بررسی جریان سیال در داخل لوله می‌توان نتیجه گرفت که در جریان آرام گرادیان هیدرولیکی متناسب با سرعت و در جریان آشفته متناسب با سرعت به توان عددی بین ۱.۷ تا ۲ می‌باشد. مقدار این توان به عدد رینولدز ($Re = \frac{\rho u D}{\mu}$) و زبری جداره داخلی لوله بستگی دارد. رابطه گرادیان هیدرولیکی و سرعت در جریان آرام توسط معادله پواسلی (رابطه (۲.۴)) به شکل زیر بیان می‌شود:

$$i = \frac{\Delta h}{l} = \frac{32\mu u}{\rho g D^2} \quad (۲.۴)$$

رابطه (۲.۴) را با کمی تغییرات در آن می‌توان به صورت رابطه زیر درآورد که البته با توجه به مقدار عدد رینولدز نمی‌توان نتیجه گرفت که در آن i متناسب با مجذور سرعت است.

$$i = \frac{64}{Re} \cdot \frac{u^2}{2gD} \quad (۳.۴)$$

یک نوع جریان که بین جریان آرام و آشفته بوجود می‌آید، جریان گذرا نامیده می‌شود. در این نوع جریان رابطه مشخصی بین Δh و u برقرار نیست. سرعت خاتمه جریان آرام و شروع حالت گذرا سرعت بحرانی پایین و سرعت خاتمه جریان گذرا و شروع جریان مغشوش یا آشفته را سرعت بحرانی بالا می‌نامند. نمودارهای زیر Δh برحسب u و $\log \Delta h$ برحسب $\log u$ را نشان می‌دهند (شکل ۲.۴).



شکل ۲.۴: نمایش تغییرات افت هد نسبت به انرژی جنبشی

در محاسبات مهندسی برای محاسبه گرادیان هیدرولیکی در جریان‌های آشسته از رابطه‌ی داریسی و ایسباخ (۴.۴) استفاده می‌شود. این رابطه به شکل زیر بیان می‌شود:

$$i = \frac{f}{D} \cdot \frac{u^2}{2g} \quad (۴.۴)$$

در رابطه فوق f ، ضریب اصطکاک لوله نامیده می‌شود که به عدد رینولدز جریان و زبری داخلی لوله بستگی دارد. از روابط فوق پیداست که اگر در جریان آرام گرادیان هیدرولیکی از رابطه‌ی داریسی - وایسباخ محاسبه شود، مقدار f عبارتست از:

$$f = \frac{64}{\text{Re}} \quad (۵.۴)$$

برای محاسبه‌ی f در جریان آشسته تجربیات زیادی انجام گرفته است و با توجه به فرضیات در هر تجربه روابط مختلفی پیشنهاد شده است. یکی از روابط پیشنهادی رابطه‌ی کلبروک است که بصورت زیر بیان می‌شود:

$$\frac{1}{\sqrt{f}} = 1.14 - 2 \log \left[\frac{\varepsilon}{D} + \frac{9.35}{\text{Re} \sqrt{f}} \right] \quad (۶.۴)$$

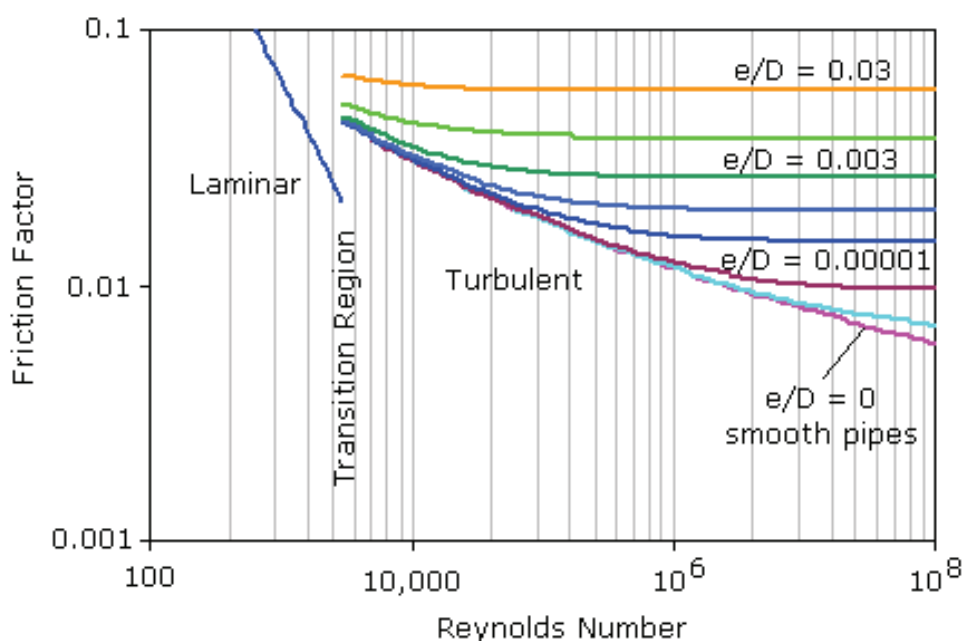
در صورتی که عدد رینولدز بین 3000 تا 100,000 و لوله صاف باشد می‌توان از رابطه‌ی پیشنهادی بلازیوس مطابق با رابطه زیر استفاده نمود.

$$f = \frac{0.3164}{Re^{0.25}} \quad (۷.۴)$$

همچنین با داشتن Re و $\frac{e}{D}$ مربوط به لوله با مراجعه به دیاگرام مودی (شکل ۳.۴) می‌توان مقدار f را بدست آورد. در عمل رابطه‌ی گرادیان هیدرولیکی برحسب سرعت را به صورت رابطه‌ی (۸.۴) می‌توان نشان داد که در آن k و n برای یک جریان و لوله معین ثابت هستند.

$$i = ku^n \quad (۸.۴)$$

مقدار n در ناحیه جریان آشفته بین ۱.۷ تا ۲ می‌باشد.



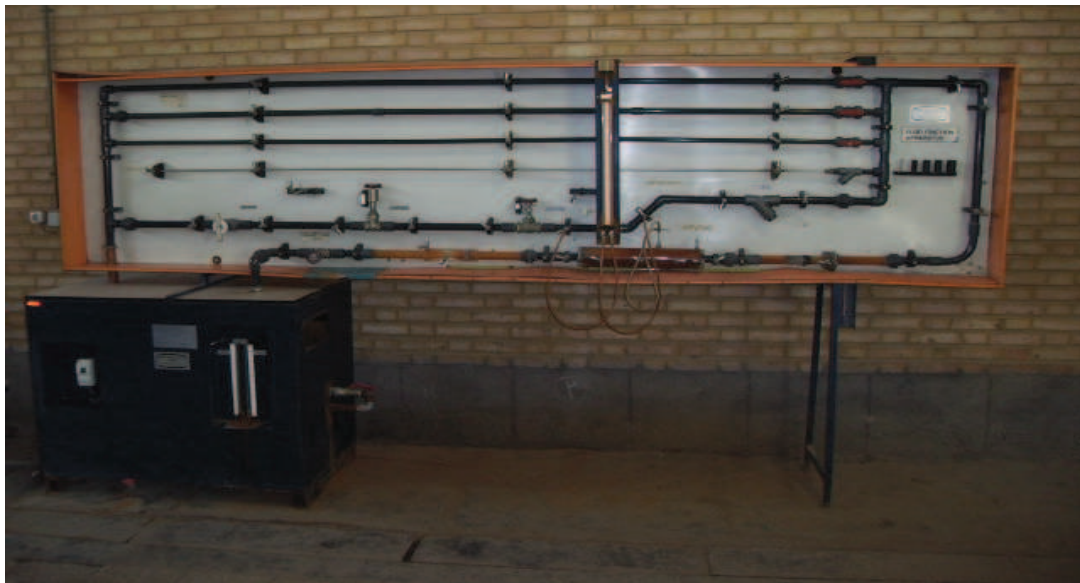
شکل ۳.۴: دیاگرام مودی

۳.۴ شرح دستگاه

دستگاه اندازه‌گیری افت فشار در اثر اصطکاک سیال از دو بخش زیر تشکیل شده است:

۱. مخزن آب که شامل قسمت مکش و تخلیه می‌باشد.
۲. تابلویی که کلیه لوله‌ها و اتصالات مختلف بر روی آن نصب شده است (شکل ۴.۴).

در قسمت تخلیه یک مخزن اندازه‌گیری حجم سیال در نظر گرفته شده است که توسط آن می‌توان با اندازه‌گیری زمان پرشدن حجم مشخصی از این مخزن، دبی جریان را محاسبه کرد. آب از قسمت مکش وارد لوله‌هایی که بر روی تابلو نصب شده است، می‌گردد. بر روی تابلو لوله‌های مختلفی نظیر لوله صاف و یا زبر و همچنین لوله‌هایی با قطرهای مختلف نصب گردیده است که جهت اندازه‌گیری افت فشار در قسمت‌های مختلف آن‌ها شیرهایی تعبیه شده است که با نصب شیلنگ به دو سر این شیرها و شیرهای مانومتر موجود می‌توان افت فشار را اندازه‌گیری نمود. در قسمت پایین تابلو شیرهای مختلفی نظیر: شیر بشقابی، شیر کشویی و شیر توپی و زانویی‌های مختلفی قرار داده شده که می‌توان با استفاده از شیرهایی که در دو سر هر یک از این اتصالات قرار دارد، افت فشار مربوط به هر یک از آن‌ها را تعیین نمود. همچنین دستگاه‌هایی نظیر اُریفیس و ونتوری نیز بر روی تابلو در مسیر جریان آب قرار دارد که می‌توان توسط آن‌ها دبی آب را نیز تعیین نمود.



شکل ۴.۴: نمایش دستگاه افت فشار



شکل ۵.۴: نمایش واحد اندازه‌گیری دبی در خروجی تابلو

اجزای اصلی دستگاه

۱. لوله زبر^۴
۲. لوله صاف^۵
۳. لوله با قطر کم
۴. سه‌راه^۶
۵. زانویی^۷های مختلف
۶. اتصال‌های مختلف
۷. شیر کشویی^۸
۸. شیر بشقابی^۹

^۴ -Roughness pipe

^۵ -Smooth pipe

^۶ -T-junction

^۷ -Elbow

^۸ -Gate valve

^۹ -Glob valve

۹. شیر تویی^{۱۰}

۱۰. ونتوری

۱۱. اُریفیس^{۱۱}

۱۲. مخزن اندازه‌گیری

۱۳. مانومترها^{۱۲}

ابعاد

• لوله‌ها

1) 17 mm I.D. × 21.5 mm O.D.

2) 15 mm I.D. × 21.5 mm O.D.

3) 07 mm I.D. × 10.0 mm O.D.

• طول لوله‌ها

1.925 in

• مخزن اندازه‌گیری

40 Lit

۴.۴ روش انجام آزمایش

۱. تمام شیرهای نصب شده جهت اندازه‌گیری فشار، بسته شوند.

۲. مخزن اندازه‌گیری دبی، تخلیه شود و پس از تخلیه شیر خروجی آن بسته شود.

۳. دستگاه روشن شود. شیر مربوط به قسمت دمش پمپ به مقدار کمی باز شود.

۴. شیر قرمز رنگ مربوط به مسیر (۱) باز شود (شکل ۶.۴).

¹⁰ -Ball valve

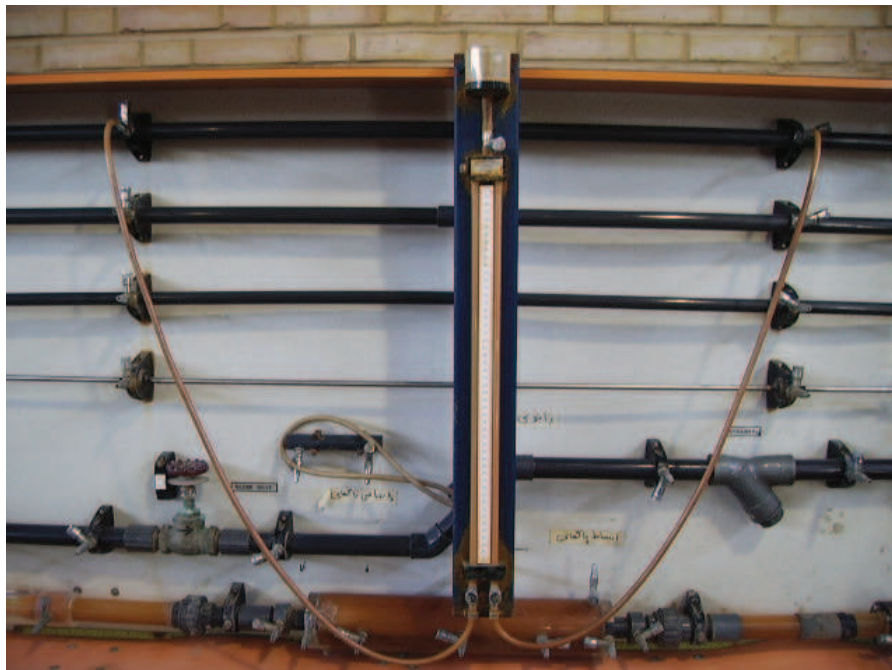
¹¹ -Orifice

¹² -Manometers



شکل ۶.۴: نمایش چگونگی وضعیت شیر قرمز رنگ در مسیر (۱)

۵. شیلنگهای مانومتر به شیرهای a و b از مسیر (۱) برای اندازه‌گیری اختلاف فشار بین نقاط a و b وصل گردند و سپس مطابق با توصیه‌های مسئول آزمایشگاه، مانومتر هواگیری شود. نمونه‌ای از مانومتر بکاررفته در آزمایش در شکل ۷.۴ نشان داده شده است.



شکل ۷.۴: نمایش مانومتر بکار رفته در آزمایش

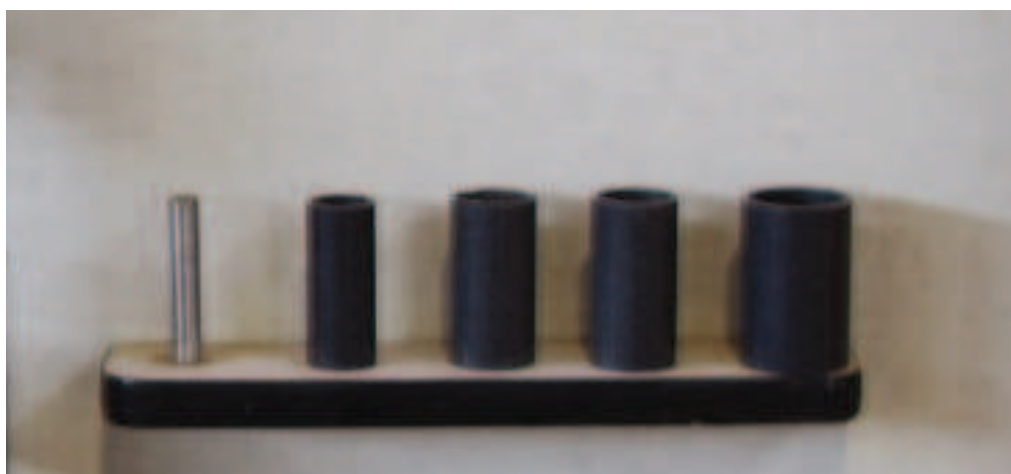
۶. برای دبی‌های مختلف، جدول ۱.۴ تکمیل شود.

۷. مراحل فوق برای مسیرهای ۲ و ۳ تکرار شود.

جدول ۱.۴: جدول ثبت دبی و اختلاف ارتفاع لوله‌های مانومتر

افت هد	زمان	حجم آب
$\Delta h (mmH_2O)$	$t (sec)$	$V (Lit)$

۸. مقدار D قطر داخلی لوله توسط کولیس اندازه‌گیری شود (نمونه‌های لوله‌ها روی پایه مخصوص تابلو مطابق شکل ۸.۴ قرار داده شده‌اند).



شکل ۸.۴: نمایش انواع لوله‌های مورد استفاده در دستگاه افت فشار

۵.۴ نتایج و محاسبات:

۱. برای هر کدام از مسیرهای (۱)، (۲) و (۳) جدول ۲.۴ را تکمیل نمایید. (زبری نسبی لوله زیر را با اندازه‌گیری توسط کولیس بصورت تقریبی اندازه‌گیری کنید.)

جدول ۲.۴: جدول ثبت داده‌های نتیجه‌گیری شده از آزمایش

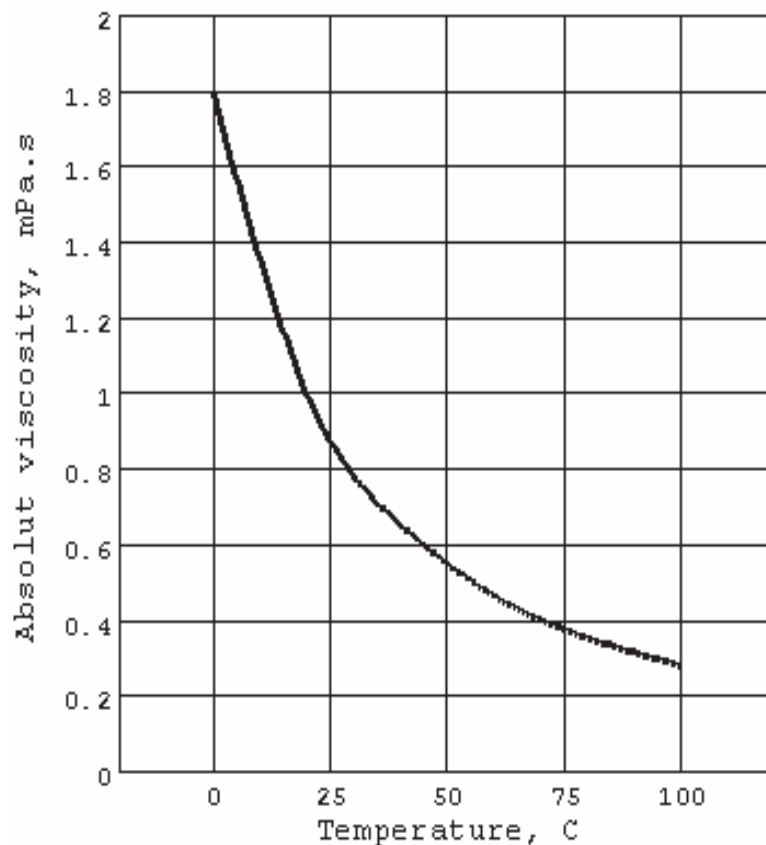
دبی $Q(Lit / s)$	سرعت $u(m / s)$	رینولدز Re	ضریب اصطکاک f بلازیوس داریسی	افت هدمحاسبه شده $\Delta h_f(mmH_2O)$	$\log u$	$\log \Delta h$	$\log \Delta h_f$

۲. نموداری از Δh و Δh_f بر حسب u برای هر سه لوله رسم کنید و از روی آن ناحیه‌های جریان آرام، گذرا و آشفته را تعیین نمایید.

۳. نموداری از $\log \Delta h$ و $\log \Delta h_f$ بر حسب $\log u$ برای هر کدام از مسیرها ترسیم نمایید. از روی نمودارها، جریان آرام، آشفته و گذرا را تعیین نمایید. مقدار n را برای جریان آرام و آشفته تعیین نمایید.

۴. اعداد رینولدز بحرانی پایین و بالا را تخمین بزنید.

۵. به کمک رابطه پواسلی مقدار ضریب ویسکوزیته، μ را محاسبه نمایید. با داشتن دمای متوسط آب در طول آزمایش ضریب ویسکوزیته آب را از نمودار شکل ۹.۴ می‌توان تعیین کرد. مقدار ضریب ویسکوزیته‌ی تجربی را با مقدار بدست آمده از نمودار مقایسه کنید.
۶. میزان خطای افت فشار محاسبه شده و افت فشار قرائت شده و درصد خطا را به ازاء هر دبی بر روی یک نمودار رسم نمایید و در مورد عوامل خطا بحث کنید.
۷. مقادیر f بدست آمده از رابطه داریسی - ویسباخ را برحسب رینولدز Re ترسیم نمایید.
۸. با استفاده از دیاگرام مودی و نتایج آزمایش زبری نسبی لوله زبر را بدست آورید و با مقدار تقریبی اندازه‌گیری شده با کولیس مقایسه نمایید.



شکل ۹.۴: دیاگرام ویسکوزیته آب بر حسب دما در فشار یک اتمسفر

۶.۴ خواسته‌های آزمایش

۱. علت خطای ایجاد شده بین Δh و Δh_f محاسبه شده را توضیح دهید؟
۲. آیا با داشتن سرعت متوسط و خصوصیات سیال می‌توان با دقت قابل قبولی، میزان افت فشار را بدست آورد؟
۳. اثر کشش سطحی و چسبندگی در لوله‌های نازک برای آب و جیوه به چه صورت ظاهر می‌شود؟
۴. رابطه پواسلی را اثبات کنید.
۵. مزایا و معایب لوله‌های *PVC*، چدنی، فولادی و مسی را به طور مختصر با هم مقایسه کنید و موارد استفاده هر یک را بنویسید.
۶. پروفیل سرعت در داخل یک لوله در جریان آرام و آشفته را رسم کنید. تنش برشی روی جداره در کدام جریان بیشتر است؟ چرا؟
۷. فرضیات به کار رفته در معادله برنولی را بنویسید.

۵ افت فشار موضعی در اتصالات

۱.۵ هدف

هدف از آزمایش تعیین افت انرژی ناشی از اجزاء یک سیستم لوله کشی (مانند: زانویی، شیر، تغییر ناگهانی مقطع لوله و خم) و رابطه‌ی بین افت انرژی و سرعت می‌باشد. همچنین ضریب افت انرژی برای اتصالات مختلف بدست آورده می‌شود.

۲.۵ تئوری آزمایش

افت انرژی کلی در یک سیستم لوله‌کشی ناشی از دو عامل است. یکی افت انرژی طولی که در اثر مقاومت نیروی چسبندگی سیال بوجود می‌آید و دیگر افت انرژی در اثر عواملی از قبیل زانویی‌ها، شیرها و یا تغییرات سطح مقطع مسیر می‌باشد. در ادامه هر کدام از این افت‌ها بطور جداگانه مورد بررسی قرار می‌گیرد.

۱. افت انرژی طولی

افت انرژی طولی در لوله‌ای مستقیم به طول l و قطر ثابت d از رابطه‌ی داریسی-وایسباخ بدست می‌آید که به صورت زیر است:

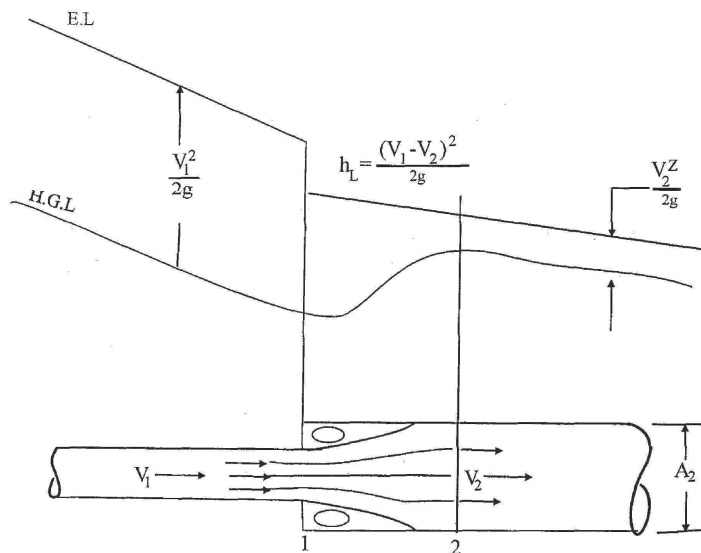
$$\Delta h_f = f \frac{l}{d} \cdot \frac{u^2}{2g} \quad (۱.۵)$$

که در آن f ثابت و بدون بعد است. مقدار f ضریب اصطکاک تابعی از عدد رینولدز جریان و زبری نسبی لوله می‌باشد. در لوله‌های نسبتاً صاف و جریانی با عدد رینولدز بین 3000 تا 100,000 مقدار f را می‌توان از رابطه‌ی بلازیوس (۲.۵) بدست آورد.

$$f = \frac{0.3164}{Re^{0.25}} \quad (۲.۵)$$

۲. افت انرژی در اثر تغییر ناگهانی سطح مقطع لوله

مقدار افت انرژی در یک انبساط ناگهانی با توجه به شکل ۱.۵ مشخص شده است:



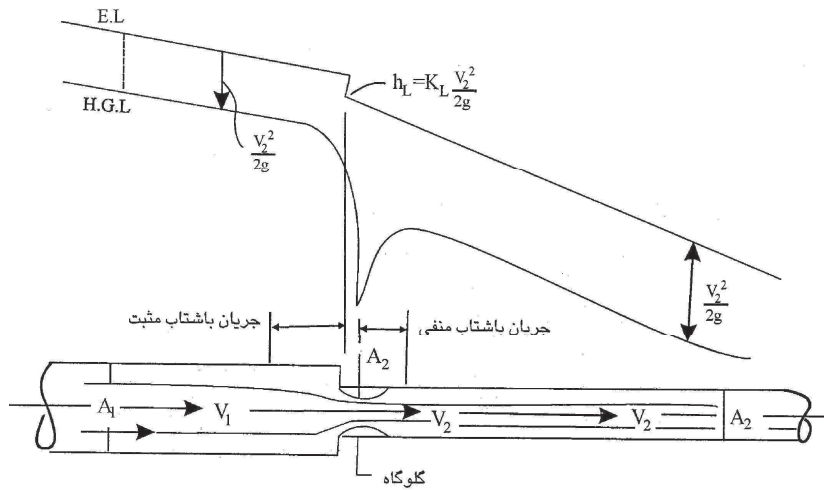
شکل ۱.۵: نمایش افت انرژی در یک انبساط ناگهانی

$$\Delta h_L = \Delta h' + \frac{u_1^2 - u_2^2}{2g} - \Delta h_f \quad (۳.۵)$$

می‌توان اثبات کرد که برای یک انبساط ناگهانی داریم:

$$\Delta h_L = \frac{(u_1 - u_2)^2}{2g} \quad (۴.۵)$$

مقدار افت انرژی در یک انقباض ناگهانی با توجه شکل ۲.۵ به صورت زیر است:



شکل ۲.۵: زنجیره‌های مختلف گاز طبیعی

$$\Delta h_L = k \frac{u_2^2}{2g} \quad (۵.۵)$$

که در آن k یک ضریب بدون بعد است که به نسبت سطوح مقاطع بستگی دارد و مقادیر آن برای چند حالت در جدول ۱.۵ ارائه شده است:

جدول ۱.۵: مقدار ضریب k بر حسب نسبت سطح‌ها در یک انقباض ناگهانی

A_1 / A_2	۰/۰	۰/۱	۰/۲	۰/۳	۰/۴	۰/۵	۰/۸	۱/۰
k	۰/۵۰	۰/۲۰	۰/۴۱	۰/۳۶	۰/۳۰	۰/۱۸	۰/۰۶	۰

۳. افت انرژی در زانویی‌ها و خم‌ها

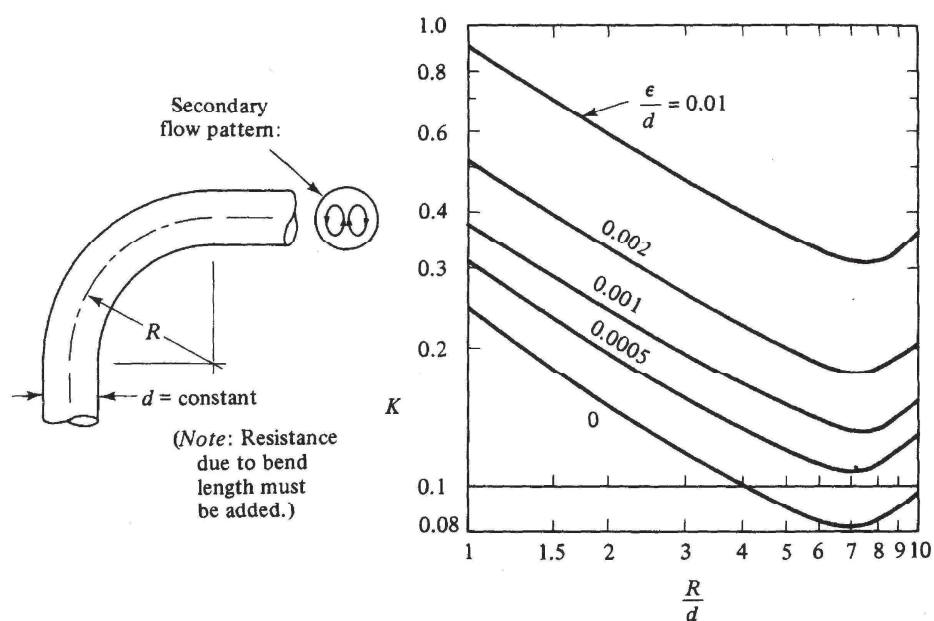
اگر در دو نقطه از مسیر لوله که بین آن دو نقطه زانویی یا خم وجود داشته باشد، یک مانومتر U شکل نصب شود اختلاف ارتفاعی که مانومتر نشان می‌دهد مربوط به دو عامل است، یکی افت انرژی طولی و دیگری افت جزئی در اثر زانویی. اگر افت انرژی طولی بین دو نقطه Δh_f و افت جزئی Δh_b و اختلاف ارتفاع پیزومترها $\Delta h'$ باشد رابطه‌ی (۶.۵) بین دو نقطه برقرار است:

$$\Delta h_b = \Delta h' - \Delta h_f \quad (۶.۵)$$

در عمل افت انرژی جزئی زانوئی را از رابطه‌ی (۷.۵) بدست می‌آورند:

$$\Delta h_b = k \frac{u^2}{2g} \quad (۷.۵)$$

که در آن k ضریب افت انرژی و یک عدد ثابت می‌باشد. مقدار ضریب افت زانوئی یا خم به نسبت شعاع انحناء زانوئی (r) به قطر زانوئی (d) بستگی دارد. شکل ۳.۵ تغییرات ضریب افت k را بر حسب نسبت $\frac{r}{d}$ نشان می‌دهد.



شکل ۳.۵: دیاگرام تغییرات ضریب افت فشار در یک خم

۳.۵ شرح دستگاه

دستگاه مورد آزمایش همان دستگاهی است که در آزمایش افت اصطکاکی مورد استفاده قرار گرفت. اتصالاتی که اندازه‌گیری افت فشار آن‌ها مدنظر می‌باشد، عبارتند از:

۱. دو عدد زانویی 45°

۲. یک عدد فیلتر مطابق شکل ۴.۵

۳. یک عدد زانویی 90°

۴. انبساط و انقباض ناگهانی سطح مقطع عبور جریان مطابق شکل ۵.۵

با اتصال شیلنگ‌های مانومتر به دو سر هر اتصال، افت انرژی در اتصال مورد نظر را می‌توان اندازه‌گیری کرد.



شکل ۴.۵: نمایش فیلتر



شکل ۵.۵: نمایش بخش انبساط و انقباض ناگهانی

۴.۵ روش انجام آزمایش

۱. روش انجام آزمایش همانند آزمایش قبل است با این تفاوت که دو سر مانومتر باید به دو سر هر اتصال وصل شود.
۲. در این آزمایش کافی است دبی در ۵ مرحله تغییر داده شود.
۳. جدول زیر برای اتصالات مختلف برای ۱۰ مورد تکمیل گردد.

جدول ۲.۵: جدول ثبت دبی و اختلاف ارتفاع لوله‌های مانومتر

افت هد $\Delta h(mmH_2O)$	زمان $t(sec)$	حجم آب $V(Lit)$

۵.۵ نتایج و محاسبات

۱. برای هر کدام از اتصالات مقدار ضریب افت انرژی k را به صورت جدول زیر محاسبه نمایید و نتیجه بگیرید که مقدار k برای هر اتصال در تمام دبی‌ها تقریباً مقداری ثابت است.

جدول ۳.۵: جدول ثبت داده‌های نتیجه‌گیری شده از آزمایش

دبی $Q(m^3/s)$	سرعت جریان $u(m/s)$	فشاردینامیکی $u^2/2g(mmH_2O)$	افت‌هد $h(mmH_2O)$	ضریب k خم 45° اول	ضریب k خم 45° دوم	ضریب k زانویی 90°	ضریب k فیلتر	ضریب k انبساط ناگهانی	ضریب k انقباض ناگهانی

۶.۵ خواسته‌های آزمایش

۱. رابطه‌ی (۴.۵) در تئوری آزمایش را بدست آورید.
۲. آیا می‌توانید بجای ضریب افت‌های بدست آمده طول معادل لوله‌ی هم قطر آن‌ها را محاسبه کنید اگر بله؟ بدست آورید و اگر نه؟ چرا؟ و اصولاً توضیح دهید که چه موقع می‌توان ضریب افت و طول معادل را بجای هم بکار برد.
۳. چرا مانومترهای مربوط به اندازه‌گیری زانوها در فاصله‌ی دورتری از زانو قرار داده شده است و همچنین شکل جریان را در زانو و بعد از آن تشریح نمایید.
۴. چهار زانوی مختلف داریم که افت فشار مربوط به هر یک را با قرار دادن در یک سیستم لوله‌کشی بدست آورده‌ایم. حال این چهار زانو را بدون واسطه در جهات مختلف به هم وصل می‌کنیم و در یک سیستم لوله‌کشی قرار داده و افت فشار آن‌ها را اندازه می‌گیریم. آیا افت فشار این مجموعه، مساوی مجموع افت فشارهای چهار زانوی منفرد است یا خیر؟ توضیح دهید.

۵. جریان ثانویه چیست؟ چگونه و در چه جاهایی بوجود می‌آید؟
۶. در مورد منابع خطا در آزمایش بطور مختصر توضیح دهید.
۷. بر خلاف سایر اتصالات، در مورد انبساط ناگهانی مانومتر بجای افت فشار، افزایش فشار را نشان می‌دهد. توضیح دهید که دلیل این امر چیست و چگونه می‌توان ضریب افت انبساط ناگهانی را بدست آورد؟

۶ افت فشار موضعی در شیرآلات

۱.۶ هدف

هدف از آزمایش تعیین افت انرژی اجزایی از یک سیستم لوله کشی بنام شیرها و رابطه‌ی بین افت انرژی و سرعت جریان می‌باشد. همچنین ضریب افت انرژی برای شیرآلات مختلف بدست آورده می‌شود.

۲.۶ تئوری آزمایش

برای سیستم‌های لوله‌کشی، شیرها به عنوان اجزاء کنترلی سیستم به کار می‌روند. شیرها جهت جداکردن تجهیزات و سیستم لوله‌کشی از یکدیگر، تنظیم دبی جریان، جلوگیری از جریان برگشتی و تنظیم و کاهش فشار استفاده می‌شوند. برای یک سیستم لوله‌کشی بایستی با اعمال دقت کافی مناسب‌ترین شیر انتخاب شود. حداقل پارامترهای طراحی برای انتخاب مناسب‌ترین شیر عبارتند از:

- اندازه
- ماده بکار رفته برای ساخت
- درجات دمایی و فشاری
- کاربرد شیر مربوطه

افت انرژی در شیرها

افت انرژی جزئی در شیرها بستگی به نوع ساختمان آن شیر دارد. به طور کلی تحلیل و محاسبات تئوریکی برای تعیین این افت‌ها وجود ندارد. اگر در بعد و قبل از شیر پیزومترهایی نصب شود می‌توان افت انرژی شیرها را به طور تجربی تعیین نمود. مقدار تجربی افت جزیی شیرها از رابطه‌ی (۱.۶) پیروی می‌کند:

$$\Delta h_L = k \frac{u^2}{2g} \quad (1.6)$$

که در آن k ضریب افت می‌باشد، مقدار k در شیرها ثابت نمی‌باشد بلکه به نوع شیر و مقدار باز بودن آن بستگی دارد.

۳.۶ شرح دستگاه

دستگاه مورد آزمایش همان دستگاهی است که در آزمایش افت اصطکاکی مورد استفاده قرار گرفت که شامل اتصالات زیر می‌باشد:

۱. شیر توپی^{۱۳}

۲. شیر کشویی^{۱۴}

۳. شیر فلکه^{۱۵}

با باز و بسته نمودن شیرهای مسیرهای مختلف می‌توان جریان آب را در یک اتصال مورد نظر هدایت نمود و با اتصال شیلنگ‌های رابط افت انرژی در یک اتصال موردنظر را اندازه‌گیری کرد.

¹³ -Ball valve

¹⁴ -Gate valve

¹⁵ -Globe valve



شکل ۱.۶: نمونه‌ای از شیر توپی



شکل ۲.۶: نمونه‌ای از شیر کشویی



شکل ۳.۶: نمونه‌ای از شیر فلکه

۴.۶ روش انجام آزمایش

روش انجام آزمایش همانند آزمایش افت فشار در اتصالات می باشد با این تفاوت که در اینجا دو سر مانومتر را به دو سر شیرآلات وصل نمایید. در کنار فلکه هر شیر یک صفحه سفید رنگ قرار دارد که به ۵ قسمت مساوی تقسیم شده است. در هر مرحله با قرار دادن فلکه شیر بر روی هریک از این خطها آزمایش را انجام دهید. کلیه داده ها را در جدولی مانند جدول ۱.۶ یادداشت نمایید. جدول ۱.۶: جدول مربوط به ثبت دبی و اختلاف ارتفاع لوله های مانومتر برای یک مقدار معین از بازشدگی

در هریک از شیرها

	افت هد $\Delta h(mmH_2O)$	زمان $t(sec)$	حجم آب $V(Lit)$
بازشدگی شیر			

۵.۶ نتایج و محاسبات

۱. جدول مشابه جدول ۲.۶ ترسیم و برای حالت های کاملاً باز، $\frac{4}{5}$ باز، $\frac{3}{5}$ باز و $\frac{2}{5}$ باز شیرها ضریب k را محاسبه نمایید و نتیجه بگیرید که مقدار k برای حالت های مختلف یک شیر تفاوت می کند.

۲. با استفاده از نتایج مورد قبل، برای هر یک از شیرها، نموداری از k بر حسب میزان بازشدگی شیر ترسیم نمایید و تفاوت مشخصه های این شیر را بیان کنید.

جدول ۲.۶: جدول مربوط به ثبت ضریب افت اصطکاکی نتیجه‌گیری شده از شیرها

دبی $Q(m^3/s)$	سرعت جریان $u(m/s)$	فشار دینامیکی $u^2/2g(mmH_2O)$	افت هد $h(mmH_2O)$	ضریب k شیرتویی	ضریب k شیرکشویی	ضریب k شیرفلکه

۶.۶ خواسته‌های آزمایش

۱. آیا می‌توانید بجای ضریب افت‌های بدست آمده طول معادل لوله‌ی هم قطر آن‌ها را محاسبه کنید اگر بله؟ بدست آورید و اگر نه؟ چرا؟ و اصولاً توضیح دهید که چه موقع می‌توان ضریب افت و طول معادل را بجای هم بکار برد.

۲. مقطعی از شیر کشویی و شیر فلکه را رسم نموده و این دو را با هم مقایسه نمایید.

۳. در مورد منابع خطا در آزمایش بطور مختصر توضیح دهید.

۴. کاربرد هر کدام از شیرهای مورد آزمایش در چه مواقعی است؟

۷ پرش هیدرولیکی

۱.۷ هدف

مطالعه‌ی تغییرات عمق و افت انرژی در کانال مستطیلی.

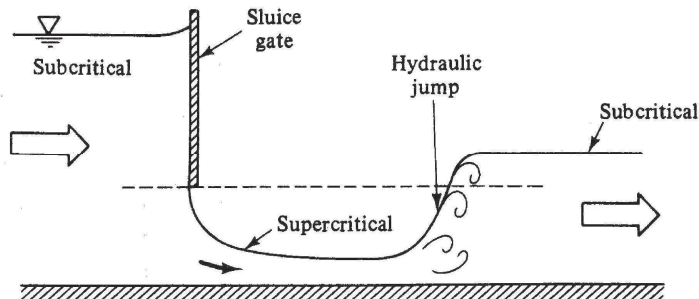
۲.۷ تئوری آزمایش

جریان در کانل باز به زبان ساده عبارت است از جریان یک مایع در مجرای روباز. هرگونه تغییر حالت در جریان که باعث تبدیل از حالت فوق بحرانی به زیر بحرانی در آب گردد به طوری که مجموعه نیروهای هیدرواستاتیک و هیدرودینامیک وارده به دو طرف آن در تعادل باشند، پرش هیدرولیکی^{۱۶} نامیده می‌شود. پرش هیدرولیکی باعث پدید آمدن شرایط زیر می‌شود:

۱. زیاد شدن فشار هیدرواستاتیک در پایین دست
۲. بالا رفتن سطح آب در پایین دست
۳. از بین رفتن سطح انرژی در پشت سرزیرها
۴. امکان اندازه‌گیری آب در حالت فوق بحرانی
۵. امکان اختلاط آب با مواد شیمیایی به دلیل وجود آشفتگی جریان
۶. امکان تهویه آب به منظور تصفیه فاضلاب

¹⁶ -Hydraulic jump

عمق آب قبل از پرش را عمق اولیه و بعد از پرش را عمق ثانویه می‌نامند. برای یافتن ارتباط بین این دو از معادله‌ی ممنتوم استفاده می‌شود (شکل ۱.۷).



شکل ۱.۷: جریان از زیر یک دریچه‌ی کشویی، از حالت زیر بحرانی به بحرانی و سپس به جریان فوق بحرانی شتاب می‌گیرد و با یک پرش به جریان زیر بحرانی باز می‌گردد.

$$\sum F = \rho Q(u_2 - u_1)$$

$$\frac{1}{2}\gamma b y_1^2 - \frac{1}{2}\gamma b y_2^2 - f = \rho Q(u_2 - u_1) \quad (1.7)$$

به دلیل این که طول پرش کوتاه است، می‌توان از اصطکاک کف (f) صرف‌نظر نمود:

$$\frac{1}{2}\gamma b(y_2^2 - y_1^2) = \rho Q\left(\frac{1}{A_1} - \frac{1}{A_2}\right)$$

$$\frac{1}{2}\gamma b(y_2 - y_1)(y_2 + y_1) = \rho Q^2\left(\frac{1}{y_1 b} - \frac{1}{y_2 b}\right) \quad (2.7)$$

ساده‌سازی رابطه فوق رابطه نهایی زیر را نتیجه خواهد داد:

$$y_2 = \frac{y_1}{2}(\sqrt{1 + 8Fr_1^2} - 1) \quad (3.7)$$

که در آن:

$$Fr_1 = \frac{u_1}{\sqrt{gy_1}} \quad (4.7)$$

Fr_1 عدد فرود نامیده می‌شود و عبارت است از نسبت نیروهای اینرسی به نیروهای ثقلی. در واقع صورت کسر سرعت حرکت سیال و مخرج کسر سرعت انتشار موج ثقلی می‌باشد. با جاگذاری سرعت حرکت سیال در عمق بحرانی، عدد فرود برابر واحد خواهد بود که این حالت

را، حالت بحرانی^{۱۷} گویند. جریانهای با سرعت بیشتر از u_{cr} را جریانهای تند یا فوق بحرانی^{۱۸} گویند که مقدار عدد فرود در این حالت بزرگتر از واحد است و جریانهای با سرعت کمتر از u_{cr} را جریانهای کند یا مادون بحرانی^{۱۹} گویند که دارای مقدار عدد فرود کمتر از واحد است. پرش‌های هیدرولیکی بر حسب عدد فرود در مقطع اولیه پرش در پنج دسته زیر قابل تقسیم است (شکل ۲.۷):

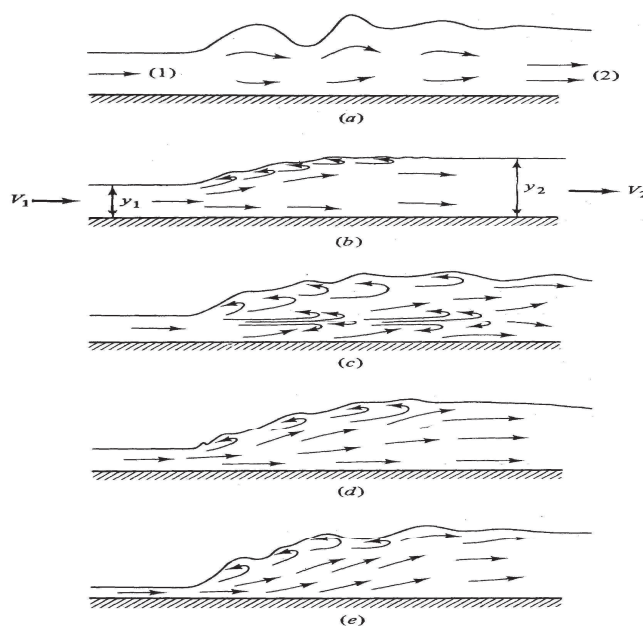
۱. $1.0 < Fr_1 < 1.7$ پرش موجی

۲. $1.7 < Fr_1 < 2.5$ پرش ضعیف

۳. $2.5 < Fr_1 < 4.5$ پرش نوسانی

۴. $4.5 < Fr_1 < 9.0$ پرش مداوم

۵. $9.0 < Fr_1$ پرش قوی



شکل ۲.۷: طبقه‌بندی انواع پرش‌های هیدرولیکی

¹⁷ -Critical

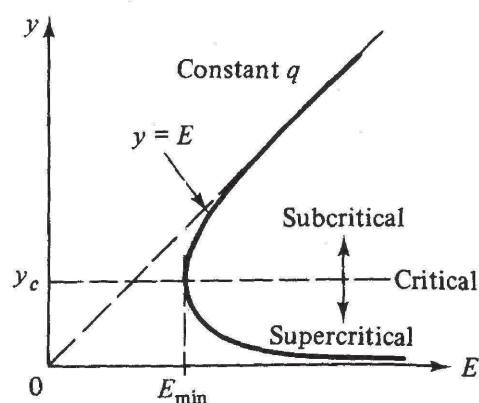
¹⁸ -Super Critical

¹⁹ -Sub critical

انرژی مخصوص (E) عامل سودمندی در جریان کانال می‌باشد. به مجموع عمق جریان در کانال و انرژی جنبشی، انرژی مخصوص گفته می‌شود، این مطلب را به زبان ریاضی بصورت زیر می‌توان بیان کرد:

$$E = y + \frac{u^2}{2g} \quad (۵.۷)$$

همواره در طول کانال از انرژی مخصوص جریان به دلیل اثرات اصطکاک دیواره‌ها کاسته می‌شود. بنابر شکل ۳.۷ می‌توان نتیجه گرفت که تحت هر شرایطی جریان در کانال به سمت جریان‌های بحرانی پیش می‌رود. در عمق بحرانی، جریان دارای کمترین مقدار انرژی مخصوص خود می‌باشد. همچنین می‌توان نتیجه گرفت که عمق جریان‌های مادون بحرانی بیش از عمق جریان‌های مافوق بحرانی می‌باشد.



شکل ۳.۷: منحنی عمق بر حسب انرژی مخصوص نشان‌دهنده‌ی این است که حداقل انرژی در عمق بحرانی اتفاق می‌افتد.

۳.۷ شرح دستگاه

دستگاه این آزمایش همان دستگاه اندازه‌گیری سرعت به کمک لوله پیتوت می‌باشد.

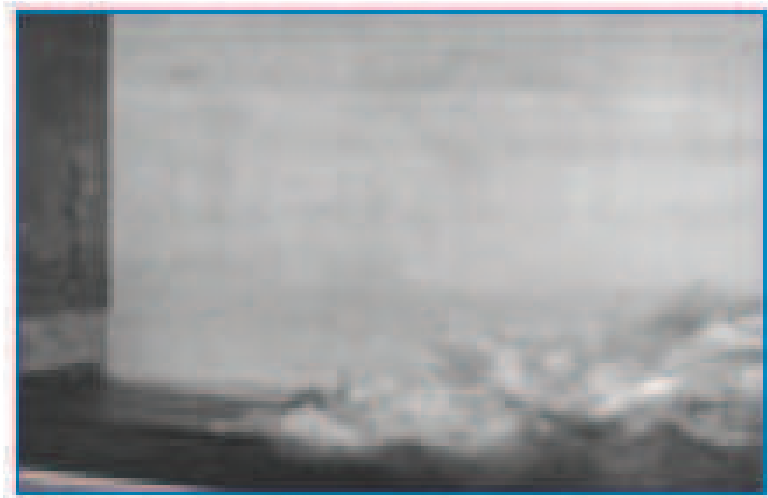
۴.۷ روش انجام آزمایش

دستگاه را توسط سوئیچ روشن-خاموش دستگاه که بر روی آن تعبیه شده است، روشن نمایید.

در هر مرحله ابتدا دبی جاری در کانال را توسط شیرهای کنترل جریان دستگاه و دبی‌سنج دستگاه تنظیم نمایید. سپس دریچه ورودی کانال را به گونه‌ای قرار دهید که جریان آب برگشتی صفر شود. در این حالت مقدار ارتفاع اولیه جریان در کانال را در جدول ۱.۷ یادداشت کنید. با استفاده از دریچه خروجی کانال یک پرش هیدرولیکی اعمال نمایید و ارتفاع آب بعد از پرش را نیز در جدول ۱.۷ یادداشت نمایید. حال مقدار ارتفاع اولیه آب را به اندازه 2 cm افزایش داده و با اعمال یک پرش هیدرولیکی ارتفاع آب بعد از پرش را بخوانید. این کار را تا آنجا ادامه دهید که با افزایش ارتفاع اولیه آب دیگر هیچ پرشی در کانال ایجاد نشود. این آزمایش را برای ۳ دبی ۵۰، ۶۵ و ۸۰ لیتر بر دقیقه انجام داده می‌شود. نمونه‌ای از یک پرش هیدرولیکی در شکل ۴.۷ نشان داده شده است.

جدول ۱.۷: جدول مربوط به ثبت داده‌های چگونگی تغییرات عمق جریان قبل و بعد از پرش هیدرولیکی

$Q(lit / min) = \dots\dots\dots$		
عمق آب بلافاصله بعد از پرش		عمق آب بلافاصله قبل از پرش
تئوری y_2	تجربی y_2	y_1



شکل ۴.۷: در پرش هیدرولیکی جریان از مافوق بحرانی به مادون بحرانی تبدیل می‌شود.

۵.۷ خواسته‌های آزمایش

۱. با محاسبه عدد فرود در مقطع اولیه پرش هیدرولیکی، نوع پرش را مشخص کنید.
۲. با استفاده از نتایج آزمایش y_2 را برحسب y_1 برای دبی‌های مختلف به دست آورید و پس از رسم بر روی یک نمودار با مقادیر تئوریک مقایسه نمایید.
۳. با محاسبه انرژی مخصوص در مقاطع قبل و بعد از پرش، افت انرژی در پرش را محاسبه کنید.
۴. عمق بحرانی را در هر مرحله آزمایش محاسبه نمایید.
۵. منحنی انرژی مخصوص $(y - E)$ را به ازای دبی‌های مختلف ترسیم نمایید.
۶. در نمودار نیروی مخصوص، آیا عمق‌های اولیه و ثانویه پرش بر روی یک خط راست موازی با محور y قرار می‌گیرند؟ چرا؟
۷. چرا در جریان‌های مادون بحرانی عمق جریان در طول کانال کاهش پیدا می‌کند؟
۸. چرا در جریان‌های مافوق بحرانی عمق جریان در طول کانال افزایش پیدا می‌کند؟

۸ اندازه‌گیری پروفیل سرعت و ضریب فشار برروی استوانه در تونل باد

۱.۸ هدف

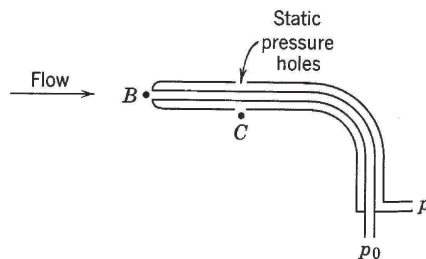
در این آزمایش هدف بدست آوردن سرعت در مقطع آزمایش یک تونل باد برای مقادیر مختلف سرعت جریان و همچنین اندازه‌گیری توزیع فشار و تعیین ضریب فشار برروی سطح یک استوانه می‌باشد.

۲.۸ تئوری آزمایش

یکی از معمول‌ترین روش‌های اندازه‌گیری سرعت جریان یک سیال، استفاده از لوله‌ی پیتوت می‌باشد که بر اندازه‌گیری فشار سکون جریان استوار است. به عبارت دیگر با اندازه‌گیری فشار سکون جریان و در اختیار داشتن فشار استاتیک آن می‌توان سرعت جریان را محاسبه کرد.

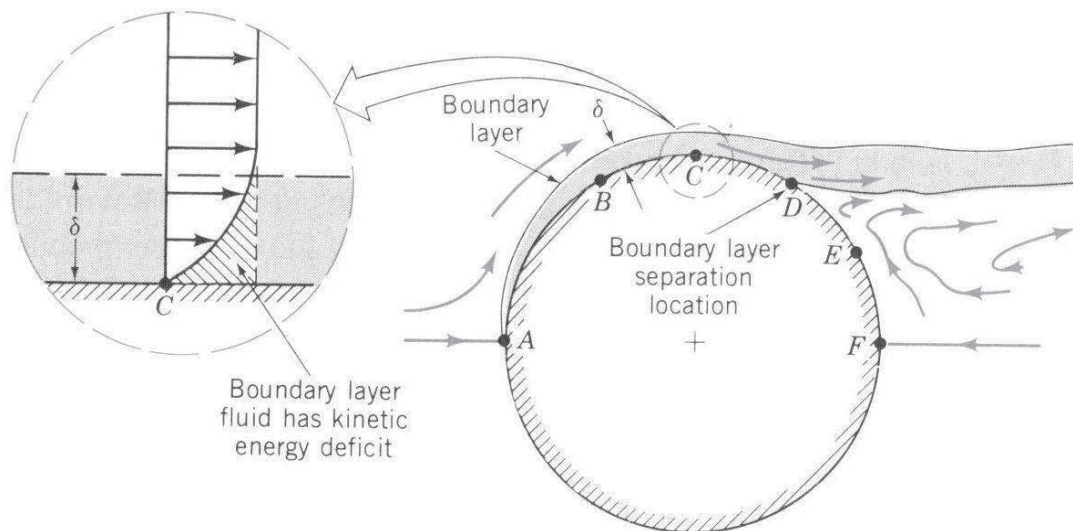
ساده‌ترین فرم لوله‌ی پیتوت عبارتست از یک لوله‌ی خمیده با زاویه‌ی 90 درجه و با قطر مناسب به طوری که اثرات موئینگی در آن قابل اغماض باشد. برای اندازه‌گیری سرعت یک سیال مانند هوا در یک مجرای باز مثل تونل، لوله را به طور قائم در راستای عمود بر خط جریان مطابق شکل ۱.۸ طوری قرار می‌دهند که انتهای دیگر آن B در مقابل جریان قرار گیرد. بدین ترتیب در نقطه B سرعت جریان به صفر رسیده و شرایط سکون برقرار می‌شود. از طرف دیگر بدلیل باریک بودن لوله مزبور جریان می‌تواند با حداقل اغتشاش از روی لوله عبور نماید. این امر موجب می‌شود که فشار سیال در نقطه C با فشار استاتیک جریان برابر باشد. اکنون چنانچه

اختلاف فشار بین نقاط B و C که معرف فشار دینامیکی سیال است، توسط یک مانومتر اندازه‌گیری شود می‌توان سرعت جریان را در آن نقطه بدست آورد.



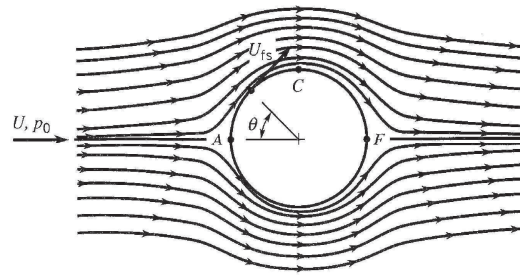
شکل ۱.۸: فرم لوله پیتوت تونل باد

در بخش دیگر این آزمایش که مربوط به توزیع فشار بر روی سطح یک استوانه است، جریان بصورت عرضی بر روی یک استوانه که امکان اندازه‌گیری فشار بر روی نقاط مختلف آن وجود دارد، جریان می‌یابد. پروفیل لایه‌مرزی تشکیل شده بر روی سطح این استوانه با مواجه شدن با گرادیان فشار غیرمطلوب از سطح استوانه جدا شده و یک دنباله پشت استوانه شکل می‌گیرد. بسته به اینکه نقطه جدایش جریان در کدام نقطه از سطح اتفاق افتد، توزیع فشار روی سطح تغییر خواهد کرد. این پدیده به صورت شماتیک در شکل ۲.۸ نشان داده شده است.



شکل ۲.۸: ماهیت لایه‌مرزی روی یک استوانه و جدایش آن

شکل ۳.۸ خطوط جریان عبوری از روی سیلندر را نشان می‌دهد.

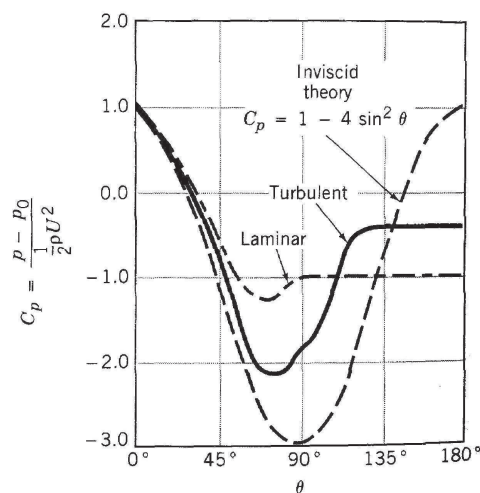


شکل ۳.۸: جریان یک سیال ایده‌آل روی یک استوانه

توزیع فشار روی سطح یک استوانه از معادله برنولی قابل محاسبه است، $p + \frac{1}{2}\rho u^2 = \text{Const}$ ، که ρ چگالی سیال می‌باشد. با بدست آوردن مؤلفه‌های سرعت بر روی سطح استوانه، مقدار ضریب فشار بر روی سطح استوانه بطور تحلیلی برابر خواهد بود با:

$$C_p = \frac{p_s - p_\infty}{\frac{1}{2}\rho u_\infty^2} = 1 - 4\sin^2 \theta \quad (۱.۸)$$

این توزیع فشار در شکل ۴.۸ نشان داده شده است. شکل ۴.۸ معین می‌کند که برایند نیروی حاصل از فشار روی جهت جریان برابر صفر است. واقعیت‌های آزمایشگاهی تفاوت‌های قابل ملاحظه‌ای از این شکل متقارن جریان غیرلزج دارند و شدیداً وابستگی ضریب فشار به عدد رینولدز را نشان می‌دهند.



شکل ۴.۸: مقایسه‌ی تئوری سیال کامل و آزمایش برای توزیع فشار روی یک استوانه

۳.۸ شرح دستگاه

دستگاه تونل باد به همراه اسباب و لوازم فرعی آن یک مجموعه‌ی آزمایشگاهی کامل برای مطالعات مخصوص در مورد آیرودینامیک است. سرعت هوا بوسیله‌ی توسط یک رثوستا با تغییر دادن درصد ولتاژ الکتریکی تنظیم می‌شود (شکل ۵.۸). جریان هوا قبل از ورود به مقطع همگرا با گذر از یک شبکه لانه زنبوری (شکل ۶.۸) به یک جریان تقریباً یکنواخت و موازی تبدیل می‌شود.



شکل ۵.۸: نمایش واحد اندازه‌گیری ولتاژ تونل باد



شکل ۶.۸: نمایش مقطع لانه زنبوری در ورودی تونل باد

ساختار اصلی تونل باد شامل یک قسمت همگرا و واگرا از جنس فایبرگلاس و یک قسمت آزمایش که از جنس رزین آکرلیک ساخته شده است، می‌باشد. قسمت دیفیوزر (واگرا) آن مستقیماً بر روی میز فرمیکایی پیچ شده، در حالیکه قسمت همگرا به دو میله‌ی لغزنده متصل شده که این دو هر کدام به طور مجزا بر روی میز فرمیکایی پیچ شده‌اند. میز فوقانی تونل (فرمیکایی) بر روی یک چهارچوب فولادی نگهداری می‌شود که این چهارچوب خود بر روی چهار چرخ غلطک‌دار سوار شده است که دو عدد از آن‌ها دارای قفل کن می‌باشند.

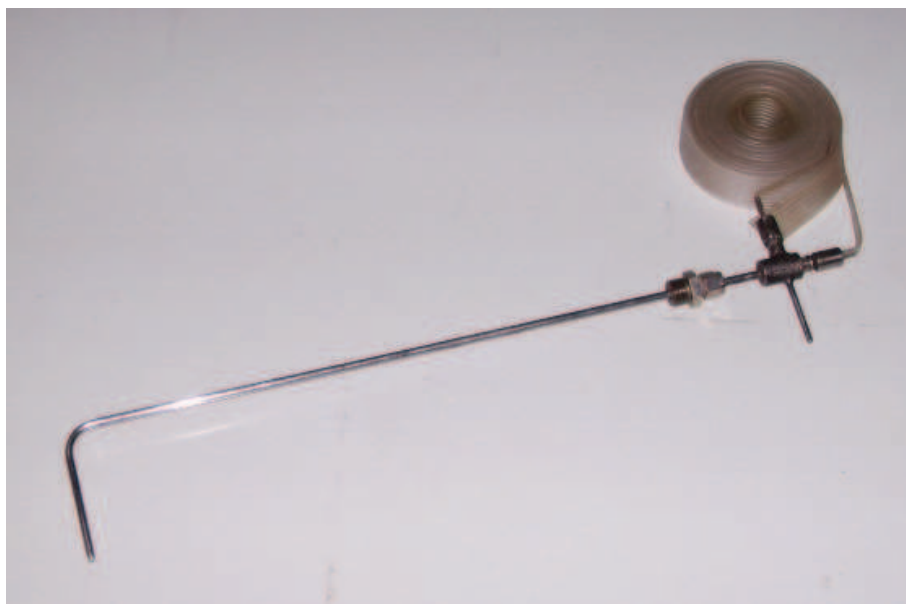
دبی کانال بوسیله‌ی یک فن که به یک موتور الکتریکی متصل شده تأمین می‌گردد (شکل ۷.۸). با تغییر دور فن می‌توان دبی سرعت هوای داخل تونل را تغییر داد. سرعت جریان به کمک لوله پیتوت (شکل ۸.۸) و اتصال آن به دو لوله از لوله‌های یک مانومتر ۲۰ لوله‌ای که در شکل ۹.۸

نشان داده شده است، قابل اندازه‌گیری است. چهارچوب روزنه استاتیکی با فواصل مساوی به دهانه متصل بوده تا احتمال اثرات برخورد و تزاخم ناشی از مدل نصب شده را در قسمت آزمایش به حداقل برساند.

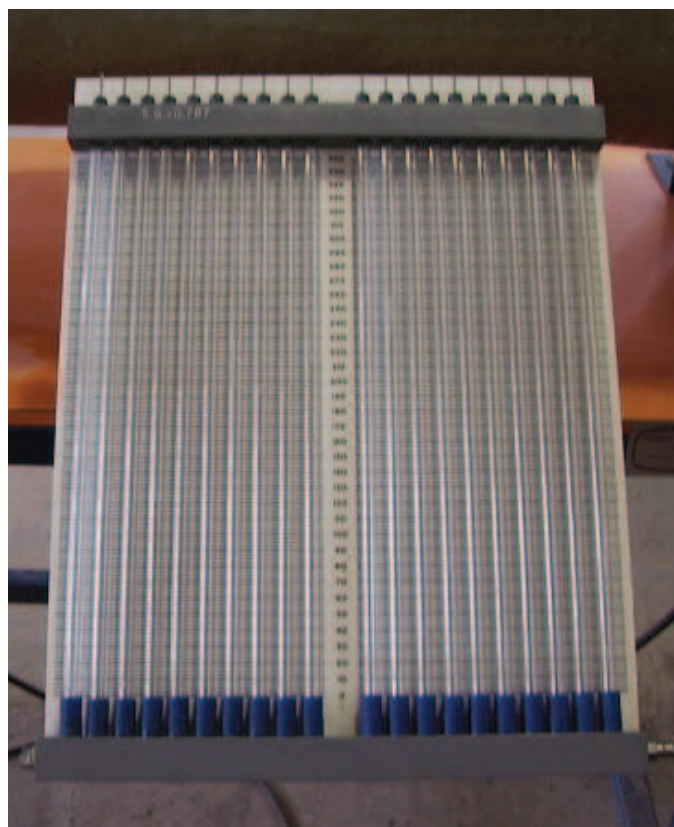
به منظور انجام آزمایش اندازه‌گیری توزیع فشار روی یک استوانه، می‌توان از استوانه‌ای که به همین منظور در دسترس می‌باشد، استفاده نمود. بر روی نصف محیط این استوانه نوزده سوراخ تعبیه شده است که بدین ترتیب زاویه بین هر دو سوراخ برابر با ده‌درجه خواهد بود. این نوزده سوراخ توسط نوزده شیلنگ باریک به نوزده لوله از مانومتر مربوطه وصل می‌شوند. بدین ترتیب ارتفاع آب هر لوله معرف فشار جریان در نقطه مربوطه می‌باشد. با اندازه‌گیری توزیع فشار بر روی استوانه و استفاده از مقادیر سرعت اندازه‌گیری شده در مرحله قبلی می‌توان ضریب فشار را روی سطح استوانه تعیین نمود. شکل ۱۰.۸ استوانه مربوطه را نشان می‌دهد. شکل کلی دستگاه تونل باد در شکل ۱۱.۸ نشان داده شده است.



شکل ۷.۸: نمایش فن تونل باد



شکل ۸.۸: نمایش لوله پیتوت تونل باد



شکل ۹.۸: نمایش مانومتر ۲۰ لوله‌ای



شکل ۱۰.۸: استوانه مربوط به اندازه‌گیری توزیع فشار



شکل ۱۱.۸: نمایش تونل باد مادون صوت

۴.۸ روش انجام آزمایش

پس از آماده شدن مانومتر و پیتوت تیوب، پیتوت تیوب را در جای خود نصب کرده و به مانومتر وصل نمایید.

دستگاه را به برق وصل کرده و تمام مأخذ قسمت آزمایش باید با صفحات پوششی پوشانیده شوند. کلید دستگاه را روی حالت *On* قرار داده و قسمت کنترل فن را که مدرج است و بر حسب درصد ولتاژ ورودی تنظیم گردیده به سمت راست می‌چرخانیم. با تغییر مقدار ولتاژ توسط صفحه‌ی کنترل سرعت هوا در تونل باد و سرعت دوران فن تغییر می‌کند.

قسمت جلوی پیتوت تیوب را موازی با جهت جریان هوا ثابت می‌کنیم با جریان یافتن هوا درون تونل باد سطح مایع درون مانومتر تغییر می‌کند. برای اندازه‌گیری سرعت ابتدا قسمت کنترل دستگاه را روی یک مقدار ثابت از درصد ولتاژ ورودی قرار داده، بعد از چند لحظه که سرعت در تونل به حالت پایداری رسید اختلاف سطح دو ستون آب درون مانومتر را قرائت کنید.

برای پیدا کردن مقادیر سرعت در نقاط مختلف با قرار دادن یک خطکش در کنار پیتوت تیوب، از سمت یکی از دیواره‌های تونل باد شروع کرده و با فواصل 2 cm به 2 cm تا سمت دیگر تونل تغییرات سطح آب درون مانومتر را یادداشت می‌کنیم.

این کار را برای تمام ولتاژهای از 60% تا 100% ولتاژ ورودی انجام می‌دهیم و در هر مرحله جدولی مانند جدول ۱.۸ تنظیم می‌نماییم.

پس از خاتمه‌ی آزمایش قسمت کنترل سرعت موتور را باید روی صفر و دکمه‌ی *On - Off* را روی *Off* قرار داد و برق دستگاه قطع گردد.

جدول ۱۸: جدول ثبت داده‌های مربوط به اندازه‌گیری سرعت

اختلاف سطح مانومتر mmH_2O	موقعیت پیتوت تیوب $x(cm)$	درصد ولتاژ ورودی $V\%$

برای اندازه‌گیری ضریب فشار بر روی سطح استوانه ۱۹ سوراخ ریز تعبیه شده است. هر یک از این سوراخ‌ها از طریق یک لوله باریک از داخل استوانه به کفه پایینی استوانه راه دارد. با استفاده از ۲ سری لوله که به ترتیب از ۱ تا ۹ و از ۱۰ تا ۱۸ و یک لوله تکی به شماره ۱۹، کلیه ۱۹ سوراخ روی جداره استوانه را به مانومتر مرتبط کنید. از آنجاییکه مانومتر مورد استفاده دارای ۲۰ لوله است، سطح آب در یک لوله مانومتر دارای فشار محیط است تا به عنوان سطح مبنا سنجش ارتفاع آب در دیگر مانومترها قرار گیرد.

با تغییر ولتاژ فن دستگاه از 60% تا 100% مقدار سطح آب در مانومترها را خوانده و در جدول ۲۸ یادداشت کنید.

جدول ۲.۸: جدول مربوط به ثبت داده‌های مربوط به اندازه‌گیری ارتفاع آب لوله‌های مانومتر متناظر با فشار
سوراخ‌های روی سطح استوانه

شماره لوله	60%	70%	80%	90%	100%	Max
۱						
۲						
۳						
۴						
۵						
۶						
۷						
۸						
۹						
۱۰						
۱۱						
۱۲						
۱۳						
۱۴						
۱۵						
۱۶						
۱۷						
۱۸						
۱۹						
۲۰						

۵.۸ نتایج و محاسبات

۱. با توجه به داده‌های آزمایش مقدار سرعت مرکز تونل را در ولتاژهای مختلف محاسبه نموده و توسط یک دیاگرام رسم کنید.
۲. پروفیل سرعت را برای ولتاژ ۸۰٪ توسط یک دیاگرام ترسیم نمایید.
۳. توزیع فشار روی استوانه را در ولتاژهای مختلف بدست آورده و توسط یک دیاگرام میزان آن‌ها را برحسب زاویه موقعیت موردنظر از صفر تا صدوهشتاد درجه ترسیم کنید.
۴. ضریب فشار روی استوانه را در ولتاژهای مختلف بدست آورده و توسط یک دیاگرام میزان آن‌ها را برحسب زاویه موقعیت موردنظر از صفر تا صدوهشتاد درجه رسم نمایید.

۶.۸ خواسته‌های آزمایش

۱. رابطه‌ی (۱.۸) تئوری آزمایش را اثبات کنید.
۲. موارد استفاده پیتوت تیوب را ذکر کنید.
۳. تأثیر درجه حرارت بر سرعت و دبی ورودی به تونل چیست؟
۴. اگر شبکه‌ی کندویی از ابتدای قسمت ورودی تونل برداشته شود. در جریان قسمت آزمایش چه تأثیری دارد؟
۵. در مقطع قبل از قسمت آزمایش علت استفاده از یک لوله که چهار نقطه‌ی مقطع را به هم ارتباط می‌دهد، چیست؟
۶. مثال‌هایی برای موارد استفاده‌ی تونل باد مادون صوت و مافوق صوت ذکر نمایید.
۷. چرا تونل باد مورد آزمایش به صورت همگرا و واگرا ساخته شده است؟

۹ اندازه‌گیری ضریب درگ اجسام مختلف در تونل باد

۱.۹ هدف

در این آزمایش هدف بدست آوردن ضریب درگ اجسام مختلف در تونل باد برای مقادیر مختلف ولتاژ ورودی به فن می‌باشد.

۲.۹ تئوری آزمایش

نیروهای مقاوم درگ^{۲۰} و بالابر^{۲۱} جریان سیال پیرامون اجسام شناور از مسائل مهم در بسیاری از رشته‌های مهندسی به شمار می‌آید. ممکن است جسم غوطه‌ور ثابت و سیال در اطراف آن در حال حرکت باشد و یا برعکس سیال ساکن و جسم غوطه‌ور در آن در حال حرکت باشد و یا ترکیبی از دو حالت فوق داشته باشیم.

نیروی مقاوم درگ F_D خود حاصل جمع دو نیروی درگ اصطکاکی^{۲۲} و درگ فشاری^{۲۳} است. نیروی اصطکاکی در اثر لزجت سیال و نیروی فشاری بعث تنش‌های عمودی حاصل می‌شود.

²⁰ - Drag Force

²¹ - Lift Force

²² - Friction Drag

²³ - Pressure Drag

محاسبه‌ی نیروی مقاوم و همچنین نیروهای بالابر عملاً کار مشکلی است زیرا به عوامل مختلفی از جمله محل تشکیل جریان گذرا از آرام به آشفته در لایه‌ی مرزی و همچنین محل جدایی جریان بستگی دارد، لذا بایستی از نتایج تجربی در محاسبه‌ی آن‌ها استفاده نمود. به همین منظور نیروهای درگ و بالابر را به صورت زیر محاسبه می‌نمایند:

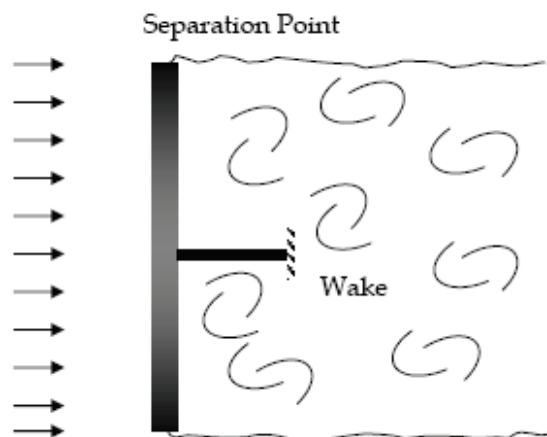
$$F_D = C_D A \frac{\rho u^2}{2} \quad (۱.۹)$$

و

$$F_L = C_L A \frac{\rho u^2}{2} \quad (۲.۹)$$

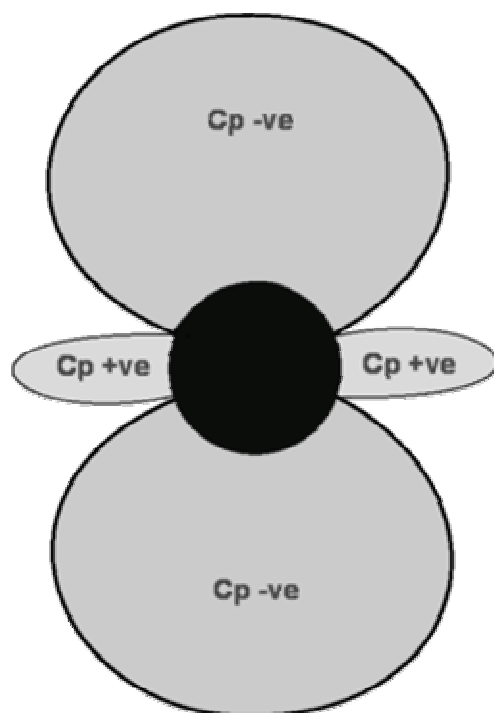
که در این روابط C_D و C_L به ترتیب ضرایب نیروی درگ و بالابر و A ماکزیمم سطح تصویر جسم است. همچنین ρ دانسیته‌ی سیال و u سرعت جریان می‌باشد. برای اجسام بال شکل تصویر آن نسبت به خط وتری بال محاسبه می‌شود.

در یک جسم با گوشه‌های تیز مانند یک صفحه که عمود بر جهت جریان سیال قرار گرفته است، نقطه‌ی جدایی در گوشه‌ی صفحه اتفاق می‌افتد و منطقه‌ی خلاء^{۲۴} برابر کل سطح می‌باشد. اگر گوشه‌های جسم به صورت منحنی باشد، موقعیت نقطه‌ی جدایی بوسیله‌ی جریان لایه مرزی آرام یا آشفته تعیین می‌گردد. موقعیت نقطه‌ی جدایی، منطقه‌ی خلاء و نیروی مقاوم درگ را تعیین می‌کند.



شکل ۱.۹: صفحه‌ی عمود بر جهت جریان سیال

هرگاه جریان سیال ایده‌آلی را هنگام برخورد با یک جسم کروی شکل مورد بررسی قرار دهیم، خطوط جریان و همچنین توزیع فشار در دو قسمت بالادست و پایین‌دست کره مطابق شکل ۲.۹ متقارن بوده و حداکثر فشار در نقاط ایستایی در دو نقطه واقع در قسمت سمت راست و چپ کره بر روی محور آن قرار خواهد داشت. حداقل فشار نیز در قسمت‌های جانبی کره در راستای عمود بر مسیر اصلی جریان واقع خواهد بود. اگر برای تمام سطح کره مقدار نیروی فشاری را بدست آوریم، مؤلفه‌ی نیروی فوق در جهت اصلی به علت تقارن توزیع فشار صفر خواهد بود. بنابراین در این حالت نیروی مقاوم فشاری وجود نخواهد داشت و به علت ایده‌آل بودن سیال نیروی مقاوم اصطکاکی نیز صفر است.



شکل ۲.۹: توزیع فشار روی کره در یک سیال ایده‌آل

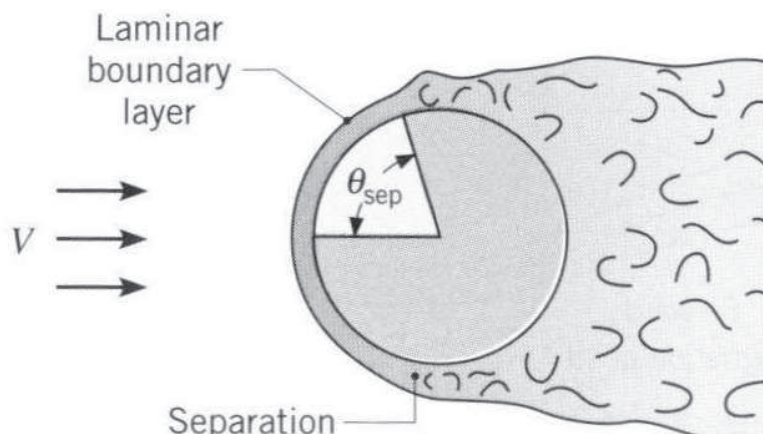
هرگاه سیال حقیقی باشد، توزیع فشار غیرمتقارن خواهد بود. در این صورت اگر سرعت جریان سیال را با u ، جرم مخصوص آن را با ρ ، ضریب لزجت دینامیکی آن را با μ و قطر کره را با D نشان دهیم، برای سرعت‌های خیلی کم جریان و یا لزجت بالای سیال به طوری که عدد رینولدز $\frac{\rho u D}{\mu}$ کوچکتر از 0.2 باشد، عبارت دیگر نیروهای لزجی غلبه زیادی بر نیروهای اینرسی داشته باشند، استوکس یک رابطه‌ی ریاضی به صورت زیر پیشنهاد نموده است:

$$F_D = 3\pi\mu uD \quad (۳.۹)$$

نیروی مقاوم اصطکاکی و فشاری به ترتیب برابر $\frac{2}{3}$ و $\frac{1}{3}$ نیروی مقاوم کل خواهد بود. ضریب نیروی مقاوم نیز برابر است با:

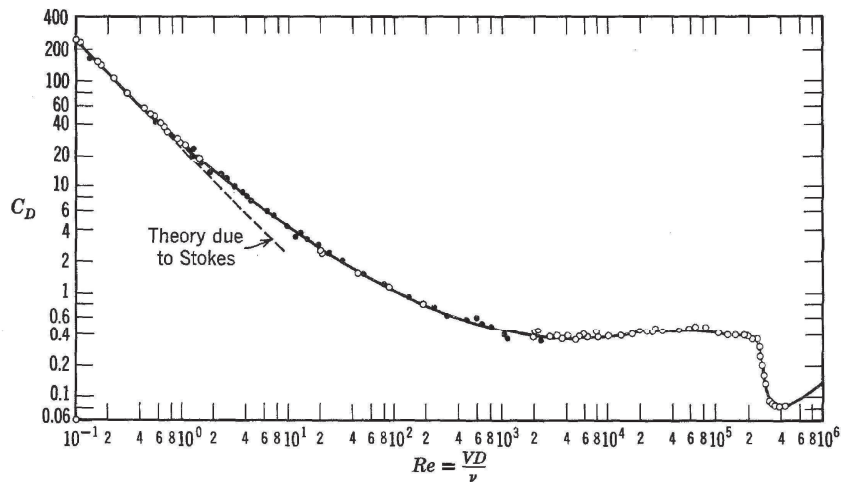
$$C_D = \frac{24}{Re} \quad (۴.۹)$$

با افزایش عدد رینولدز اثر نیروی لزجت کاسته می‌شود و مقدار C_D کاهش می‌یابد. جدایی لایه مرزی از نقطه‌ی ایستایی شروع می‌شود و به ازاء عدد رینولدز برابر $Re \approx 1000$ وضعیت آن کم و بیش ثابت بوده و تقریباً زاویه‌ی حمله 80° با نقطه‌ی ایستایی تشکیل می‌دهد. در شکل ۳.۹، توزیع فشار روی کره برای یک سیال نیوتنی در اعداد رینولدز $10^3 < Re < 10^5$ نشان داده شده است. در قسمت پایین‌دست کره یک منطقه‌ی برخاستگی وسیعی تشکیل می‌شود که باعث بوجود آمدن مقدار زیادی نیروی مقاوم فشاری تا حدود 95% مقدار کل نیروی مقاوم می‌گردد.



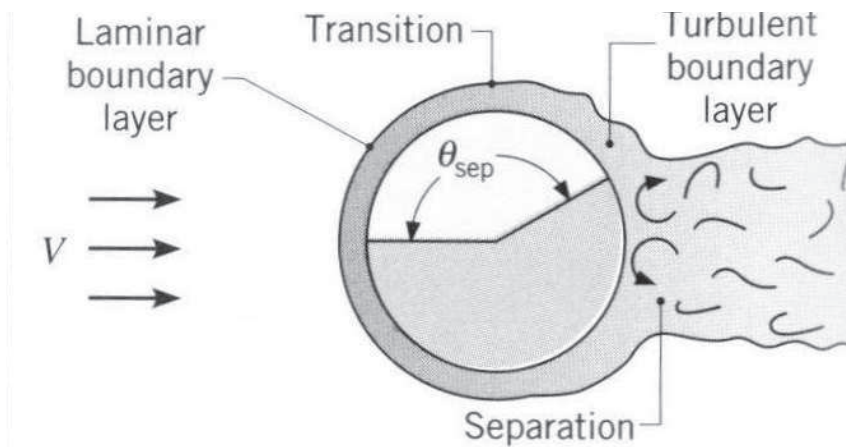
شکل ۳.۹: توزیع فشار روی کره برای یک سیال نیوتنی $10^3 < Re < 10^5$

به همین جهت همانطور که در شکل ۴.۹ نیز ملاحظه می‌شود، مقدار ضریب نیروی مقاوم C_D در فاصله‌ی $10^3 < Re < 10^5$ تقریباً مستقل از عدد رینولدز می‌باشد و تغییرات کمی دارد.



شکل ۴.۹: ضریب C_D بر حسب عدد رینولدز برای کره

ذرات سیال در جریان متلاطم بهتر می‌توانند با گرادیان فشار غیریکنواخت مقابله می‌کنند، در نتیجه جداشدن جریان دیرتر صورت می‌گیرد و نقاط جدایی به سمت پایین‌دست جریان منتقل می‌شوند. برای یک کره در اعداد رینولدز بالاتر از $Re > 10^5$ زاویه‌ی جدایش همانطور که در شکل ۵.۹ نشان داده شده است 110° می‌باشد.



شکل ۵.۹: توزیع فشار روی کره برای یک سیال نیوتنی در $Re > 10^5$

منطقه‌ی خلاء در این حالت کوچکتر می‌گردد و ضریب C_D از مقدار ۰.۵ به ۰.۲ کاهش می‌یابد. ملاحظه می‌شود که وقتی لایه مرزی از حالت لایه‌ای به آشفته تبدیل می‌شود ضریب نیروی مقاوم به مقدار قابل ملاحظه‌ای کاهش می‌یابد. مقدار عدد رینولدز بحرانی که به ازاء آن لایه مرزی به حالت آشفته تبدیل می‌شود، ثابت نیست و به پارامترهای متعددی بستگی دارد و با افزایش آشفتگی جریان اصلی و همچنین افزایش زبری سطح مقدار آن کاهش می‌یابد.

۳.۹ شرح دستگاه

در آزمایش اندازه‌گیری سرعت در تونل باد، دستگاه آزمایش توضیح داده شده است. مدل‌های موجود برای انجام آزمایش عبارتند از:

۱. کره

۲. نیم‌کره با تقعر نسبت به جهت جریان هوا

۳. نیم‌کره با تحدب نسبت به جهت جریان هوا

۴. دیسک دایره‌ای شکل

۵. نمونه‌ی دوکی شکل

علاوه بر نمونه‌های فوق یک میله‌ی نگهدارنده‌ی یدکی جهت کالیبره‌کردن دقیق‌تر نیروی درگ وجود دارد. در ته میله نگهدارنده‌ی هر مدل دو زائده تعبیه شده است. این زائده‌ها در درون سوراخ موجود در قسمت بالانس دستگاه قرار گرفته و بدین ترتیب جریان محوری متقارن بالای مدل ایجاد و ارتفاع بین خط مرکزی مدل و لبه‌های تیز بالانس جهت کالیبره‌کردن بالانس کاملاً صحیح می‌باشد. نمونه‌ای از مدل‌های مورد آزمایش در شکل ۶.۹ نشان داده شده‌اند.

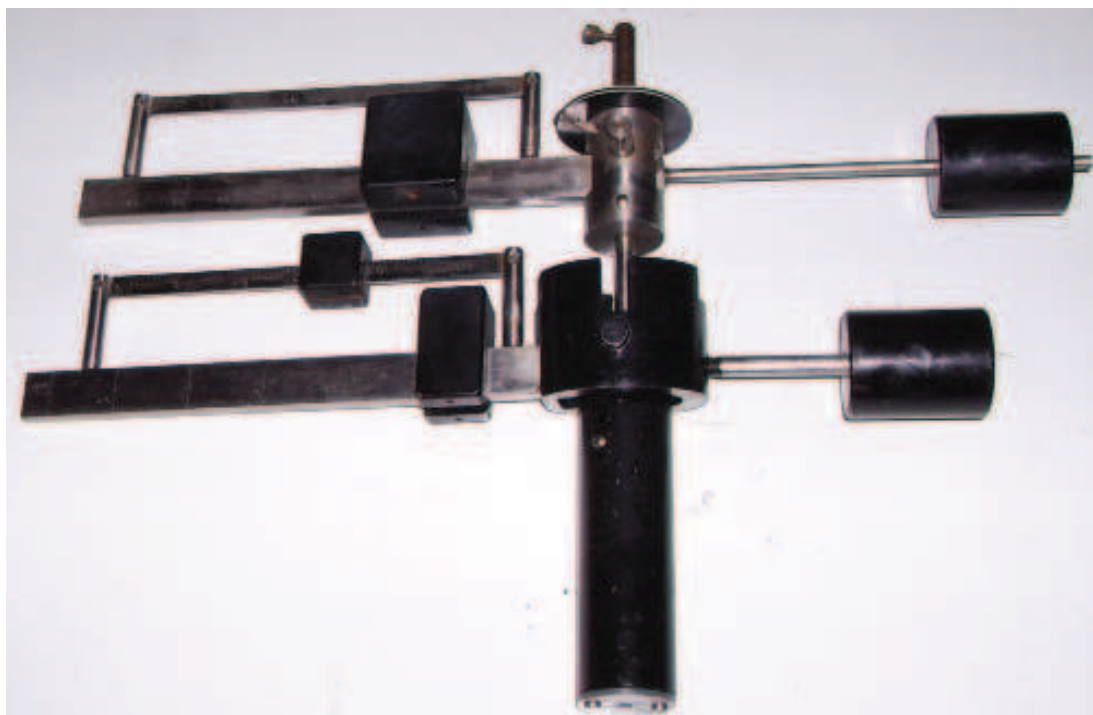


شکل ۶.۹: مدل‌های مورد آزمایش

چون مدل‌ها دارای وزن‌های متفاوت هستند، لذا برای هر کدام می‌بایست به طور جداگانه قبل از ورود جریان هوا با تنظیم وزنه تعادل حالت تعادل قسمت بالانس را بوجود آورد. برای کسب نتایج دقیق‌تر، ضرورت دارد که مقدار نیروی درگ میله‌ی نگهدارنده مدل را به حساب آورد. برای این منظور یک عدد میله اضافه در ظر گرفته شده است که می‌توان یک منحنی سرعت-نیروی درگ جداگانه نیز برای آن بدست آورد. بدین ترتیب برای هر مدل می‌توان نیروی مقاوم را با دقت بهتری بدست آورد. در هنگام آزمایش باید روزنه و سوراخ موجود در کف تونل در قسمت آزمایش را با استفاده از صفحات پوششی تا حد امکان پوشاند.

قسمت بالانس تونل باد

دو مؤلفه‌ی بالانس آیرودینامیکی بعنوان لوازم فرعی استاندارد برای این تونل باد مورد استفاده قرار گرفته است. این سیستم بالانس شامل یک جفت تیر بالانس^{۲۵} که بر روی لبه‌ی چاک‌دار که دو سر روی محورهای عمود بر هم نگهداری می‌شوند، می‌باشند. محورهای مذکور به صورت موازی و عمود بر خطوط جریان در تونل باد قرار دارند. مؤلفه‌های نیروی مقاوم درگ و بالابر که بر روی مدل اعمال می‌شود با لغزاندن و حرکت دادن وزنه‌ها در طول بازوی بالانس قابل اندازه‌گیری است. با حرکت وزنه‌ها هنگامی که میله در حالت تعادل قرار گیرد، می‌توان مقادیر نیروها را خواند. بازوهای بالانس بر حسب واحد نیرو درجه‌بندی شده‌اند. به قسمی که نیروی مقاوم یا بالابر مستقیماً می‌تواند خوانده شوند. دستگاه در شکل ۷.۹ نشان داده شده است.



شکل ۷.۹: قسمت بالانس دستگاه تونل باد

میله‌ی مرکزی قائم بالانس به یک پیچ قفل مجهز شده است تا بتوان مدل را روی قسمت بالانس محکم کرد. همچنین بوسیله‌ی یک نقاله زاویه‌ی حمله انتخابی سریعاً می‌تواند تغییر و تعویض شود. زاویه‌ی انتخاب شده را می‌توان در همان حالت دلخواه و موردنظر بوسیله‌ی یک پیچ ثابت کرد.

²⁵ -Beam balance

به انتهای پایین محور عمودی یک دمپر تیغه‌ای صلیبی متصل شده است این تیغه در یک طرف استوانه‌ای به نام ظرف نوسان‌گیر که به زیر میز وصل گردیده، آویزان می‌باشد.

۴.۹ روش انجام آزمایش

۱. بخش همگرا تونل باد را به عقب بکشید.
۲. پیچ مربوط به محل قرارگیری مدل را شل کرده و مدل را در محل خود قرار داده به طوری که زائده‌های مدل در شکاف قسمت تعادل جا می‌گیرد. سپس پیچ را محکم می‌کنیم به طوری که در سرعت‌های بالای هوا در داخل تونل مدل لق نشود.
۳. بخش همگرا تونل باد را بح حالت اولیه برگردانید.
۴. با صفحات پوششی مانند تونل باد تا آن‌جا که ممکن است، پوشانده شود.
۵. بوسیله‌ی آچار آلن وزنه تعادل بازوی اندازه‌گیری نیروی درگ را آن‌قدر جابجا کرده تا بازوی تعادل نیروی درگ در برابر شاخص صفر قرار گیرد. در این حالت وزنه‌ها باید روش صفر باشند.
۶. دستگاه را روشن کنید و با حرکت صفحه‌ی چرخان ولتاژ ورودی را روی 60% قرار دهید. در این حالت می‌توان با استفاده از نتایج بدست آمده از آزمایش اندازه‌گیری سرعت در تونل باد مقدار سرعت در قسمت آزمایش را بدست آورد.
۷. با حرکت هوا از داخل قسمت آزمایش و اعمال نیرو به مدل بازوی تعادل از حالت اولیه خود خارج می‌شود، در این حالت با جابجا کردن وزنه‌هایی که روی بازوی تعادل قرار دارند شاخص دوباره به روی صفر برگردانیده و تعادل برقرار می‌گردد.
۸. نیروی درگ وارد شده به مدل و میله مستقیماً از روی بازوی تعادل خوانده می‌شود.
۹. آزمایش برای درصدهای مختلف ولتاژ ورودی از 30% تا 100% با میزان افزایش ولتاژ 10% تکرار شود.
۱۰. کلیه‌ی مراحل فوق برای مدل‌های دیگر موجود در آزمایشگاه تکرار گردد.

۱۱. برای نتیجه‌گیری دقیق‌تر، یک میله که هم‌قطر با میله‌ی نگهدارنده‌ی مدل است را در قسمت آزمایش تونل قرار داده و آزمایش را برای این میله تکرار نمایید. اگر نیرویی که در هر سرعت معین به میله‌ی مذکور وارد می‌شود، از کل نیروی وارده به مدل کم شود نیروی خالص وارده به مدل بدست می‌آید.

۱۲. در خاتمه‌ی آزمایش درصد ولتاژ ورودی را روی 0% قرار داده و دستگاه را خاموش کرده و مدل را از تونل خارج نمایید.

۵.۹ نتایج و محاسبات

۱. در سرعت‌های مختلف عدد رینولز را محاسبه و در جدولی تنظیم نمایید.
۲. نیروی خالص هر کدام از مدل‌ها را در سرعت‌های متفاوت محاسبه و در جدولی تنظیم نمایید.
۳. برای هر یک از مدل‌ها در سرعت‌های مختلف ضریب نیروی درگ را محاسبه و در جدولی تنظیم کنید.
۴. نمودار ضریب نیروی مقاوم C_D را بر حسب عدد رینولدز برای مدل‌های مختلف ترسیم نمایید و در مورد آن بحث کنید.

۶.۹ خواسته‌های آزمایش

۱. ضریب نیروی درگ برای یک کره صاف بیشتر است یا کره‌ی زبر؟ چرا؟
۲. ضریب نیروی درگ برای یک پوسته نیم‌کره‌ای که جهت تقعر آن به سمت جریان باشد بیشتر است یا پوسته‌ی نیم‌کره‌ای که جهت تحدب آن به سمت جریان هوا باشد؟ چرا؟
۳. لایه مرزی را در اطراف یک جسم دوکی شکل ترسیم کرده و قسمت‌های مختلف آن را مشخص کنید.
۴. حداقل سه روش برای کنترل لایه مرزی ذکر نمایید.

۵. در مورد روند تغییرات C_D بر حسب اعداد رینولدز بحث کنید.

۶. نقطه‌ی جدایش لایه مرزی چگونه توصیف می‌شود؟

۷. تفاوت اصطکاک پوسته‌ای و مقاومت فشاری چیست؟

۱۰ آزمایش منحنی مشخصه پمپ سانتریفوژ

۱.۱۰ هدف

بررسی عملکرد پمپ گریز از مرکز در دوره‌های ثابت و دبی‌های متغیر، اندازه‌گیری هد، رسم منحنی‌های مشخصه پمپ و تعیین نقطه بهینه.

۲.۱۰ تئوری آزمایش

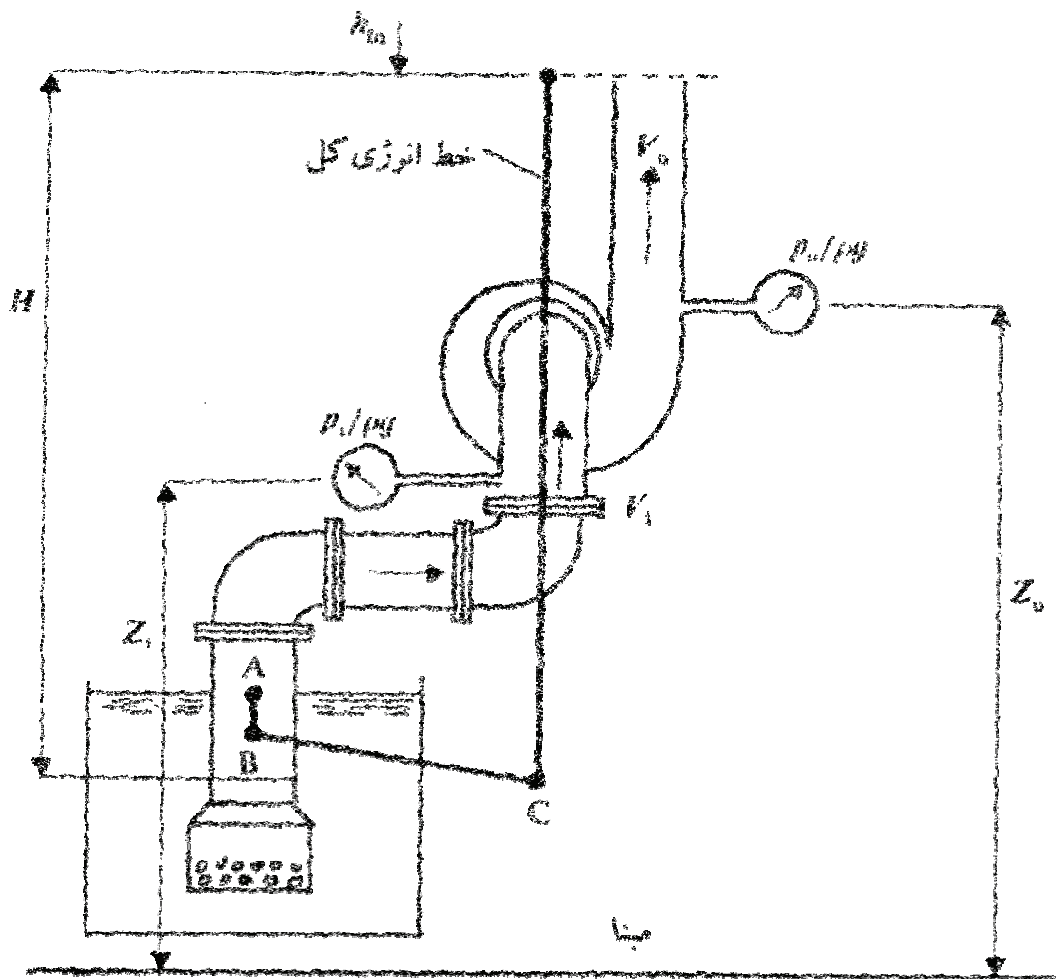
پمپ‌ها را با توجه به شکل ساختمان داخلی و شرایط کارکرد به دو گروه پمپ‌های دورانی^{۲۶} و پمپ‌های رفت و برگشتی^{۲۷} تقسیم می‌کنند. این نام‌گذاری به علت طبیعت عمومی جریان سیال درون پروانه این پمپ‌ها می‌باشد. هر دو پمپ براین اساس کار می‌کنند که انرژی مایع به وسیله شتاب مماسی گرفتن در پمپ افزایش می‌یابد. این انرژی توسط پروانه تأمین می‌شود که خود پروانه توسط موتور الکتریکی یا وسائل محرکه دیگر می‌چرخد. پمپ موردنظر این آزمایش، پمپ دورانی و دارای پروانه شعاعی است.

سیستم پمپ‌کردن عمومی در پمپ‌های گریز از مرکز با توجه به شکل ۱.۱۰ این چنین است که از یک مخزن پایین جریان سیال به سمت بالا پمپ می‌گردد. در هر نقطه سیستم، فشار، ارتفاع و سرعت را می‌توان برحسب هد کل اندازه‌گیری شده از خط مبنا بیان کرد. برای مخزن پایین هد کل در سطح آزاد H_A و برابر با اختلاف ارتفاع سطح آزاد با خط مبنا است، زیرا سرعت و فشار

^{۲۶} -Centrifugal pump

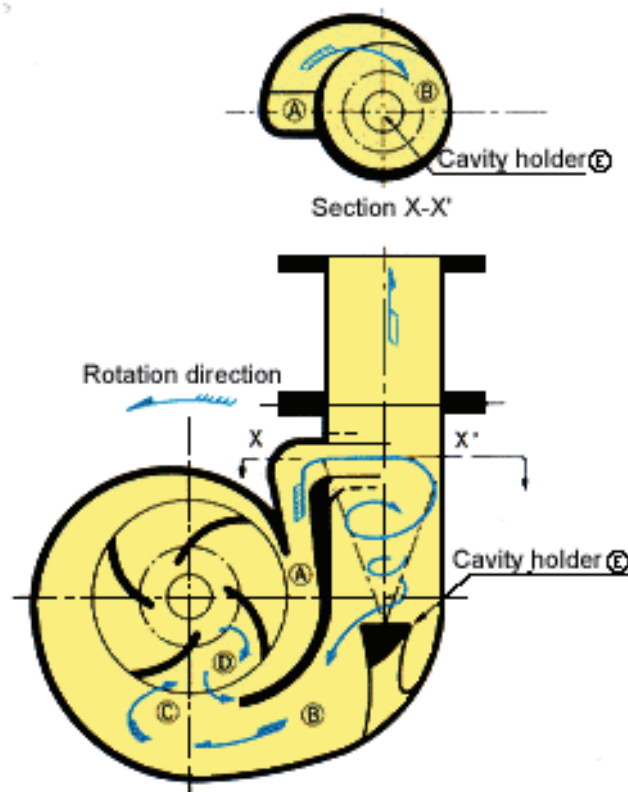
^{۲۷} -Reciprocating pump

استاتیک در نقطه‌ی A صفر است و سیال که وارد لوله ورودی می‌شود باعث افت با مقدار هد h_{in} می‌شود چون هد کل به نقطه‌ی B افت می‌کند. وقتی سیال از لوله ورودی به فلنج پمپ در ارتفاع Z_i جریان یابد هد کل بخاطر اصطکاک و سایر افت‌ها h_{fi} به C کاهش پیدا می‌کند. سیالی که وارد پمپ می‌شود، انرژی می‌گیرد و تا نقطه‌ی D در خروجی پمپ بیرون می‌رود.



شکل ۱.۱۰: نمودار یک سیستم پمپ

نمونه‌ای از یک پمپ گریز از مرکز در شکل ۲.۱۰ نشان داده شده است.



شکل ۲.۱۰: نمونه‌ای از یک پمپ گریز از مرکز

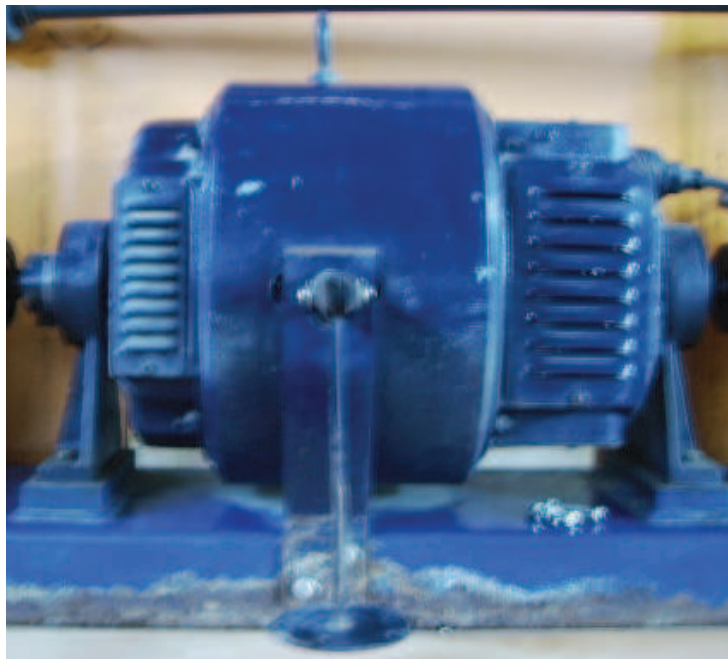
اگر هدهای کل ورودی و خروجی پمپ در فلنج‌های ورودی و خروجی اندازه‌گیری شوند که معمولاً آزمایش استاندارد پمپ‌هاست، پس:

$$\begin{aligned} \text{Inlet Head} &= \frac{P_i}{\rho g} + \frac{V_i^2}{2g} + Z_i \\ \text{Outlet Head} &= \frac{P_o}{\rho g} + \frac{V_o^2}{2g} + Z_o \\ \text{Total Delivered Head} &= \frac{P_o - P_i}{\rho g} + \frac{V_o^2 - V_i^2}{2g} + Z_o - Z_i \\ &= H \end{aligned} \quad (۱.۱۰)$$

ذکر این نکته ارزش آن را دارد که بدانیم برای اندازه‌های مساوی خروجی و ورودی، V_i و V_o یکی هستند و در عمل $Z_o - Z_i$ نسبت به $\frac{P_o - P_i}{\rho g}$ خیلی کوچک و قابل صرف‌نظر کردن است لذا جای تعجب نیست که هد فشار استاتیک پمپ اغلب برای توضیح هد کل تولیدشده توسط پمپ استفاده می‌شود.

۳.۱۰ شرح دستگاه

دستگاه مورد نیاز آزمایش از یک الکتروموتور تشکیل شده است (شکل ۳.۱۰) که دور آن را می‌توان توسط رئوستای تنظیم دور تغییر داد (شکل ۴.۱۰) و با کمک دورسنج می‌توان دور را به میزان دلخواه تنظیم نمود (شکل ۵.۱۰). پمپ گریز از مرکز با شکل پره‌های محدب^{۲۸} از طریق کوپلینگ به محور موتور متصل و توسط آن دوران می‌کند (شکل ۶.۱۰). پمپ و موتور روی پایه‌هایی بالای مخزن آب قرار گرفته است. مخزن شامل دو قسمت است. قسمتی مربوط به آب خروجی از پمپ‌ها می‌باشد که دو توری تلاطم‌گیر در آن نصب شده و در خروجی آن یک سرریز V شکل قرار دارد (شکل ۷.۱۰). که برای اندازه‌گیری دبی از آن استفاده می‌شود.



شکل ۳.۱۰: توان ورودی پمپ گریز از مرکز توسط الکتروموتور تأمین می‌گردد.



شکل ۴.۱۰: با تغییر رئوستا می‌توان دور الکتروموتور را تنظیم نمود.



شکل ۵.۱۰: برای نمایش دور الکتروموتور از دورسنج استفاده می‌شود.



شکل ۶.۱۰: محور پمپ توسط کوپلینگ به شفت الکتروموتور متصل شده است.



شکل ۷.۱۰: سرریزها از جمله سازه‌هایی مکانیکی هستند که برای تعیین دبی بکار برده می‌شوند.

برای بدست آوردن دبی به صورت تئوری از رابطه‌ی (۲.۱۰) استفاده می‌شود:

$$Q = \frac{8}{15} c_e h_e^{5/2} \sqrt{2g} \quad (۲.۱۰)$$

که در آن:

$$h_e = h + k_h \quad (۳.۱۰)$$

ومقادیر h و c_e عبارتند:

ارتفاع اندازه‌گیری شده با استفاده از سطح سنج: h

$$k_h = 0.00085$$

$$c_e = 0.5765$$

در قسمت دیگر مخزن که لوله‌های مکش پمپ‌ها در آن قرار دارند، مخزن اصلی آب دستگاه است (شکل ۸.۱۰). لوله‌کشی روی مجموعه همراه با شیرهای نصب شده روی آن، این امکان را فراهم می‌نماید که آزمایش‌هایی روی پمپ‌ها به صورت تکی، موازی با هم و یا به صورت سری انجام گیرد. یک شیر تنظیم جریان در خروجی مشترک دو پمپ نصب شده که با استفاده از آن می‌توان دبی را کنترل نمود (شکل ۹.۱۰). در انتهای لوله‌ی مکش هر دو پمپ شیرهای یک طرفه‌ای نصب شده که به ماندن آب در لوله‌ی مکش کمک می‌کند.



شکل ۸.۱۰: نمایی از مخزن اصلی

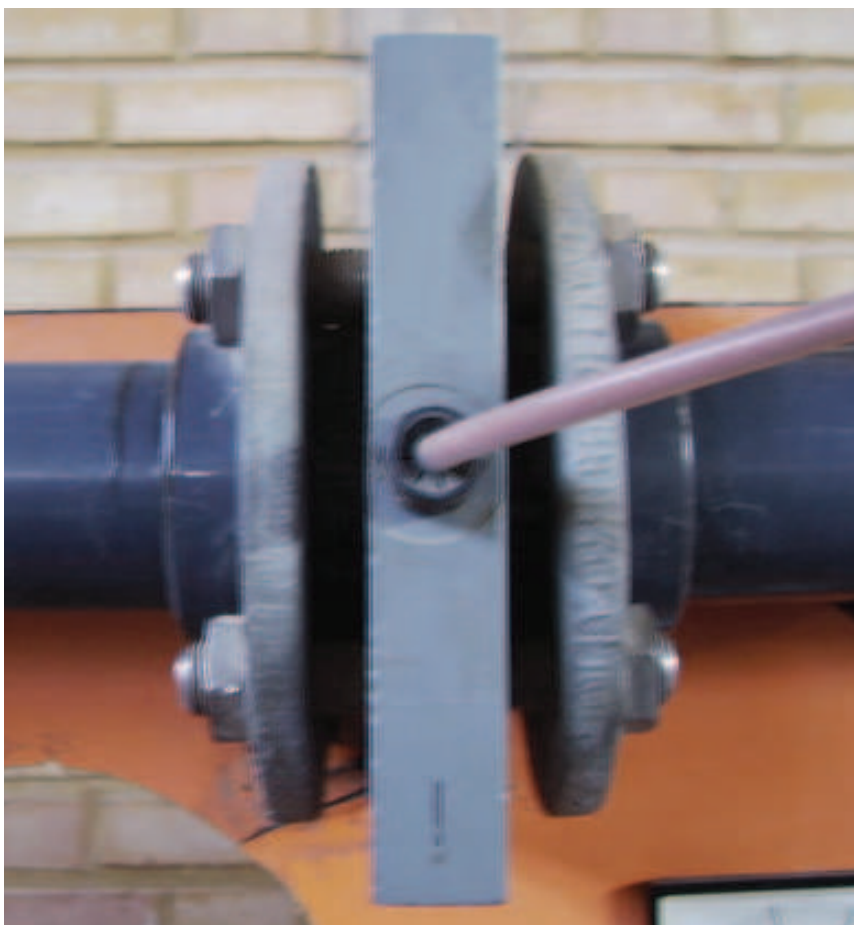


شکل ۹.۱۰: با استفاده از یک شیر توپی می‌توان دبی را در لوله‌ها تنظیم نمود.

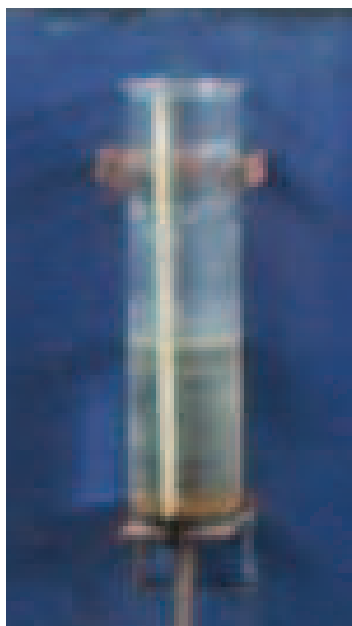
علاوه بر سرریز V شکل، یک اُریفس نیز روی لوله‌ی خروجی نصب شده است (شکل ۱۰.۱۰). اختلاف سطح بین حالتی که دبی صفر است با حالتی که جریان سیال از سرریز داریم را می‌توان با استفاده از سطح‌سنجی که درون استوانه‌ی شیشه‌ای جلوی دستگاه قرار دارد، بدست آورد (شکل ۱۱.۱۰). این استوانه‌ی شیشه‌ای از طریق لوله‌ای شفاف به ته مخزن منتهی به سرریز وصل شده است که سطح آب در آن هم سطح آب درون مخزن است. در قسمت‌های مکش و خروجی پمپ، مجرای فشارسنجی تعبیه شده است که به فشارسنج‌هایی از نوع فشارسنج‌های بُردن متصل شده و می‌توان فشار را بر حسب مترآب قرائت کرد (شکل ۱۲.۱۰).

قطر لوله‌ی مکش: 71.75 mm

قطر لوله‌ی تخلیه: 25.40 mm



شکل ۱۰.۱۰: نمایی از اریفیس بکار رفته در سیستم Piping دستگاه پمپ گریز از مرکز.



شکل ۱۱.۱۰: سطح‌سنج مبین سطح آب عبوری از سرریز V شکل می‌باشد.



شکل ۱۲.۱۰: به جهت نشان دادن فشار در هریک از مقاطع انتهایی پمپ از فشارسنج‌های بُردن استفاده می‌شود.

۴.۱۰ روش انجام آزمایش

ابتدا باید دستگاه آزمایش را هواگیری نمود برای این منظور تمام شیرهای موجود روی دستگاه را باز کنید و از روی مجرای تعبیه شده در مسیر لوله‌های بالای پمپ شماره (۱)، با باز کردن پیچ بسته شده روی آن، آنقدر آب بریزید تا آب از آن سرریز شود و سپس پیچ روی مجرا را ببندید. برای اطمینان از صحت هواگیری، در این حالت اگر الکتروموتور را روشن کنید و هر دو شیرهای فلکه‌ای روی پمپ‌ها را کاملاً باز کنید، باید جریان سیال یکسان و پیوسته‌ای از آن‌ها جاری باشد. پس از کسب اطمینان از صحت هواگیری، این شیرها را باید بست.

از آنجایی که در این آزمایش تنها یافتن منحنی مشخصه‌ی یک پمپ مدنظر می‌باشد، ابتدا باید یکی از پمپ‌ها را از مدار خارج نمود. برای این منظور شیرهای واقع روی سیستم لوله‌های بین دو پمپ را مطابق با شکل ۱۳.۱۰ به حالت بسته قرار دهید. شایان ذکر است به جهت جلوگیری از گرم شدن پمپ (۲) در طول آزمایش می‌توان شیرفلکه‌ای روی آن را به حالت باز نگه داشت.



شکل ۱۳.۱۰: با بستن شیرهای روی سیستم لوله‌ای بین دو پمپ تنها پمپ (۱) در مدار باقی خواهد ماند.

برای شروع آزمایش دور الکتروموتور را روی 2900 rpm قرار دهید و شیر کنترل دبی را به حالت کاملاً باز قرار دهید، دبی را با خواندن تغییر ارتفاع آب در سطح سنج نسبت به سطح مبنا

محاسبه نمایید. به ازای اعمال حداکثر دبی عبوری از پمپ، اختلاف فشار سیال عبوری از پمپ را با استفاده از فشارسنج‌های بُردن روی تابلوی دستگاه نشان داده شده در شکل ۱۴.۱۰ تعیین کنید. با تغییر میزان بازشدگی شیر کنترل دبی، ارتفاع آب عبوری از سرریز V شکل را به پنج قسمت به ازای دبی عبوری یکسان از هر قسمت تقسیم کنید و در هر مرحله میزان اختلاف فشار سیال عبوری از پمپ را یادداشت کنید.



شکل ۱۴.۱۰: در شکل بالا فشارسنج سمت راست فشار سیال ورودی و فشارسنج سمت چپ فشار سیال خروجی را در پمپ نشان می‌دهد.

آزمایش را برای دور مختلف یعنی 2900 rpm , 1450 rpm انجام دهید و نتایج را در جدول ۱.۱۰ ثبت کنید.

جدول ۱.۱۰: جدول مربوط به ثبت نتایج آزمایش پمپ گریز از مرکز

هدکلی (m)	هدخروجی (m)	هدمکش (m)	ارتفاع آب روی سرریز V شکل (m)

۵.۱۰ نتایج و محاسبات

۱. با استفاده از مقادیر بدست آمده، منحنی مشخصه پمپ را در هر دور مختلف بر روی یک منحنی رسم کنید.
۲. با استفاده از روابط تشابهی پمپ‌ها، منحنی مشخصه مربوط به دور بالا را با استفاده از دور پائین بدست آورده و با نتایج آزمایشگاه مقایسه نمایید.

۶.۱۰ خواسته‌های آزمایش

۱. پمپ‌های جابجائی مثبت چه پمپ‌هایی هستند و کاربرد آنها در چه مواردی است؟
۲. منظور از ارتفاع مکش مثبت خالص (NPSH) چیست؟
۳. حداکثر ارتفاعی را که پمپ گریز از مرکز می‌تواند بالاتر از مخزن مکش قرار گیرد را به صورت تابعی از شرایط محیط و سیال به دست آورید.
۴. رابطه محاسبه دبی را با استفاده از سرریز مثلی بدست آورید.
۵. در مورد منابع خطا در آزمایش بطور مختصر توضیح دهید؟

الف نمونه صفحه عنوان گزارش

در این پیوست نمونه‌ای از صفحه عنوان برای هر گزارش تهیه شده و بعنوان اولین صفحه گزارش کامل در نظر گرفته می‌شود. نکته‌ای که حائز اهمیت است این است که باید درصد همکاری هرکدام از اعضای گروه در تهیه گزارش کامل مقابل نام و نام خانوادگی آنها درج شود. میزان درصد همکاری هرکدام از اعضا بعنوان معیاری از نمره گزارش کامل به فرد مربوطه در نظر گرفته می‌شود.

آزمایشگاه مکانیک سیالات

عنوان آزمایش :

ردیف	نام و نام خانوادگی	شماره دانشجویی	درصد همکاری
۱			
۲			
۳			
۴			

تاریخ انجام آزمایش :

روز :

ساعت :

گروه :

دسته :

مرتبه نویسی	
هدف، تئوری، شرح آزمایش	
نمونه محاسبات و بدست آوردن نتایج	
رسم منحنی ها و بحث و نتیجه گیری	
تحويل به موقع گزارش	
نمره از ۵۰	

تاریخ تحويل گزارش :

امضای مسئول آزمایشگاه :