بسم الله الرحمن الرحيم

دانشگاه صنعتی اصفهان

دانشکده مکانیک

طراحی و ساخت دبی‌سنج نوسانی به منظور اندازه‌گیری دبی آب

پایان‌نامه کارشناسی ارشد مهندسی مکانیک- ساخت و تولید

حمید مددکن

استاد راهنما

دکتر علیرضا فدایی تهرانی

۱۳۹۰

دانشگاه صنعتی اصفهان

دانشکده مکانیک

پایان‌نامه کارشناسی ارشد رشته مهندسی مکانیک آقای حمید مددکن

تحت عنوان

طراحی و ساخت دبی‌سنج نوسانی به منظور اندازه‌گیری دبی آب

در تاریخ ۱۳۹۰/۱۲/۱۵ توسط کمیته زیر مورد بررسی و تصویب نهایی قرار گرفت.

۱. استاد راهنمای پایان‌نامه	دکتر علیرضا فدایی تهرانی
۲. استاد مشاور پایان‌نامه	دکتر مهدی نیلی احمد آبادی
۳. استاد داور	دکتر احمد سوهانکار
۴. استاد داور	دکتر عباس قائی
سرپرست تحصیلات تکمیلی دانشکده	دکتر محمدرضا سلیم‌پور

کلیه حقوق مادی مترتب بر نتایج مطالعات، ابتکارات و نوآوری‌های ناشی از تحقیق موضوع این پایان‌نامه (رساله) متعلق به دانشگاه صنعتی اصفهان است.

تشکر و قدردانی

خداوند را شکر که در سراسر زندگی، هدایت گر همه بندگان به سوی حقیقت و راستی است. و درود بر دردانه دو عالم حضرت محمد مصطفی صلوات الله علیه و آله، اسوه انسانیت و کمال برای همه طالبان حقیقت.

از پدر و مادر عزیزم که همه موفقیت‌های خود را مدیون محبت‌ها و تلاش‌های بی دریغ آن‌ها می‌دانم، کمال تشکر و سپاس را دارم.

بر خود لازم می‌دانم از زحمات کلیه عزیزانی که اینجانب را در مراحل انجام پروژه یاری رساندند، به خصوص استاد راهنما آقای دکتر فدایی تهرانی، استاد مشاور آقای دکتر نیلی احمدآبادی، همچنین آقای دکتر حمید منظرالقائم، آقای مهندس محمد حسن کریمی، آقای مهندس ساسان خلج و آقای مهندس محمد حسین حسینی کمال تشکر و قدردانی نمایم.

تقدیم به پدر و مادر مهربانم

فهرست مطالب

عنوان	صفحه
فهرست مطالب	هشت
چکیده	۱
فصل اول : مقدمه	
۱-۱ تعریف	۲
۱-۲ روش‌های مختلف اندازه‌گیری دبی آب	۳
۱-۲-۱ دبی‌سنج‌های با جابجایی مثبت	۳
۱-۲-۲ دبی‌سنج‌های اندازه‌گیر سرعت	۳
۱-۲-۳ دبی‌سنج‌های ترکیبی	۴
۱-۲-۴ دبی‌سنج‌های الکترومغناطیس	۴
۱-۲-۵ دبی‌سنج‌های مافوق صوت	۴
۱-۲-۶ دبی‌سنج‌های بر مبنای نوسان سیال	۵
۱-۳ تئوری و اصول حاکم بر مسئله	۶
۱-۴ انواع دبی‌سنج‌های نوع نوسانی	۸
۱-۴-۱ نوع دارای مسیر بازگشتی (Feedback type)	۸
۱-۴-۲ نوع دارای مانع (Target type)	۸
۱-۴-۳ نوع Vortex Shedding	۹
۱-۵ مفهوم انواع فشار در مکانیک سیالات	۹
۱-۶ برخی کاربردهای نوسان سیال	۱۰
۱-۷ تاریخچه فعالیت‌های انجام گرفته	۱۰
۱-۷-۱ K.Sakai و همکارانش در سال ۱۹۸۹م.	۱۰
۱-۷-۲ H.Yamasaki در سال ۱۹۹۳م.	۱۱
۱-۷-۳ F.Cascetta و همکارش در سال ۱۹۹۴ م.	۱۲
۱-۷-۴ R.F.Boucher در سال ۱۹۹۵ م.	۱۳
۱-۷-۵ Uzol. O. و همکارش در سال ۲۰۰۲ م.	۱۵
۱-۷-۶ Aik Chong Lua و همکارش در سال ۲۰۰۳ م.	۱۶
۱-۷-۷ Jing-Tang Yang و همکارانش در سال ۲۰۰۷ م.	۱۷
۱-۸ هدف از انجام پروژه	۱۸
۱-۹ محتوای فصل‌های بعدی	۱۹
فصل دوم : مدل‌سازی و معرفی اجزای دستگاه	

۲-۱ مقدمه و تعاریف ۲۱
۲-۲ مزایا و معایب برخی از انواع دبی‌سنج نوسانی ۲۲
۲-۳ دریافت اطلاعات هندسی از طریق تصویر برداری اشعهٔ ایکس ۲۳
۲-۳-۱ تصویربرداری اشعهٔ ایکس از قطعه ۲۴
۲-۳-۲ دریافت اطلاعات هندسی از تصاویر ۲۶
۲-۴ مدل‌سازی بخش‌های مختلف ۲۹
۲-۴-۱ قطعهٔ شامل مجرای اصلی ۲۹
۲-۴-۲ درب ۳۰
۲-۴-۳ قطعات تنظیم کنندهٔ عرض دهانهٔ ورودی ۳۰
۲-۴-۴ دیوارهٔ مانع ۳۱
۲-۴-۵ نصب حسگر پیزوالکتریک ۳۲
۲-۴-۶ تزریق مادهٔ رنگی به داخل جریان ۳۲
۲-۴-۷ حسگر مبدل فشار ۳۳
۲-۴-۸ کارت دریافت داده‌ها ۳۳
۲-۴-۹ نصب قطعات بر روی یکدیگر ۳۴

فصل سوم : انتخاب حسگر، داده‌برداری و پردازش سیگنال

۳-۱ مقدمه ۳۵
۳-۲ بررسی حسگرهای قابل استفاده ۳۶
۳-۲-۱ ویژگی‌های حسگرهای قابل استفاده در اندازه‌گیری فرکانس نوسانات سیال ۳۶
۳-۲-۲ انواع حسگر قابل استفاده در اندازه‌گیری فرکانس نوسانات سیال ۳۶
۳-۲-۳ مزایا و معایب حسگرهای معرفی شده در یک نگاه ۴۷
۳-۳ نمونه برداری ۴۸
۳-۳-۱ معیار نایکویست ۵۰
۳-۳-۲ تفیک پذیری و خطای سطح بندی ۵۱
۳-۳-۳ بیش داده برداری ۵۲
۳-۴ بررسی سیگنال در حوزهٔ فرکانس ۵۳
۳-۴-۱ سری فوریه ۵۳
۳-۴-۲ تبدیل فوریه ۵۴
۳-۴-۳ تبدیل فوریه گسسته ۵۵
۳-۵ حذف فرکانس‌های اضافی از سیگنال اصلی ۵۶
۳-۵-۱ فیلترهای دیجیتال ۵۶

۳-۵-۲ مفهوم فیلترکردن ۵۷
۳-۶ فعالیت‌های انجام گرفته در زمینهٔ دریافت و پردازش سیگنال‌ها ۵۹
۳-۶-۱ انتخاب حسگر ۵۹
۳-۶-۲ دریافت، نمایش و ذخیره‌سازی داده‌ها توسط نرم‌افزار LabVIEW 8.5 ..... ۶۲
۳-۶-۳ پردازش و بررسی سیگنال‌ها در نرم افزار MATLAB ۶۴
فصل چهارم : شبیه‌سازی عددی فرآیند
۴-۱ مقدمه ۷۰
۴-۲ بررسی معادلات حاکم بر جریان سیال ۷۱
۴-۳ روش گسسته سازی معادلات حاکم بر جریان سیال ۷۳
۴-۴ جریان آرام و جریان آشفته ۷۵
۴-۵ تحلیل و مدل‌سازی جریان‌های آشفته ۷۷
۴-۵-۱ تجزیهٔ میدان سرعت به مؤلفه‌های متوسط و نوسانی ۷۷
۴-۵-۲ مدل‌سازی عددی جریان‌های آشفته ۷۸
۴-۶ شرایط نزدیک به دیوار ۸۲
۴-۷ روند انجام گرفته در شبیه‌سازی عددی جریان سیال در هندسهٔ دبی‌سنج ۸۴
۴-۷-۱ مراحل انجام یک شبیه‌سازی عددی ۸۴
۴-۷-۲ تعیین اهداف ۸۵
۴-۷-۳ تعیین حوزهٔ حل ۸۵
۴-۷-۴ هندسهٔ مورد استفاده به عنوان حوزهٔ حل ۸۶
۴-۷-۵ مش‌بندی ۸۷
۴-۷-۶ فیزیک حاکم بر حوزه حل ۹۱
۴-۷-۷ انتخاب روش حل ۹۳
۴-۷-۸ حل مسئله ۹۴
۴-۷-۹ دریافت نتایج حاصل از شبیه‌سازی ۹۴
فصل پنجم : بررسی نتایج حاصل از آزمایش و شبیه سازی عددی
۵-۱ مقدمه ۹۸
۵-۲ مفهوم برازش منحنی ۹۸
۵-۳ بدست آوردن موقعیت مناسب قرارگیری حسگر مبدل فشار یا حسگر پیزواکتریک ۹۹
۵-۴ نتایج حاصل از شبیه‌سازی عددی و مقایسه با نتایج تجربی ۱۰۵
۵-۵ اندازه‌گیری دبی به صورت خودکار توسط نرم‌افزار نوشته شده ۱۱۰
۵-۶ بررسی اثر فاکتورهای مهم هندسی در چگونگی عملکرد دستگاه در اعداد رینولدز پایین ۱۱۱

فصل ششم : نتیجه‌گیری و ارائهٔ پیشنهادات

۶-۱ نتیجه‌گیری ۱۲۰
۶-۲ پیشنهادات ۱۲۲
مراجع و منابع ۱۲۳

چکیده

تاکنون برای اندازه‌گیری دبی آب روش‌های متعددی ابداع شده است. دبی‌سنج‌هایی که بر مبنای نوسان سیال عمل می‌کنند یکی از این روش‌هاست. در دبی‌سنج‌های نوسانی[1] با ورود جریان سیال از یک نازل به داخل مجرایی دیفیوزر شکل (با دودیوارهٔ زاویه‌دار)، پس از مدت بسیار کوتاه، جت جریان ورودی شروع به نوسانی پایدار بین دو دیواره و در طول زمان کرده و باعث نوسانات منظم سرعت و فشار می‌گردد. با توجه به رابطه‌ای که بین فرکانس نوسان جت سیال با سرعت ورودی آن به مجرا دارد، می‌توان دبی عبوری را اندازه‌گیری کرد. این نوع دبی‌سنج‌ها دارای هیچ عضو متحرک نبوده و قابلیت آن را دارد که در دبی های بسیار کم خطای کمی داشته باشد.

در این پژوهش بعد از بررسی اصول حاکم بر عملکرد دبی‌سنج‌های نوسانی، فرآیند مهندسی معکوس بر روی یک نمونهٔ موجود آغاز می‌شود. بدین منظور، برای اطلاع از هندسهٔ داخلی آن از روش غیرمخرب عکس‌برداری اشعهٔ ایکس استفاده می‌شود. با بررسی دقیق‌تر هندسه ومدل‌سازی آن، یک نمونهٔ آزمایشگاهی دبی‌سنج نوسانی طراحی و ساخته شده است. روند انتخاب نوع حسگر، داده‌برداری سیگنال‌های ارسالی از حسگر و بررسی پردازش سیگنال‌ها از جمله مسائل انجام گرفته است.

به منظور آگاهی دقیق‌تر از چگونگی حرکت جریان سیال در مجرای دبی‌سنج، همچنین یافتن موقعیت مناسب قرارگیری حسگرهای اندازه‌گیرندهٔ نوسان، از شبیه‌سازی عددی جریان سیال استفاده می‌گردد. برای مطالعه عددی جریان غیر دائم، با استفاده از نرم افزار CFX، این مجرا شبکه‌بندی می‌شود. با توجه به آشفته بودن جریان، اثر مدل‌های آشفتگی Standard K-ε و Shear Stress Transport K-ω (SST) در حالت غیر دائم، بر روی جریان آب در مجرا مورد بررسی قرار گرفته، مدل آشفتگی مناسب انتخاب و در نهایت با نتایج تجربی انجام شده توسط نمونهٔ ساخته شده، مقایسه می‌شود.

تعیین موقعیت مناسب قرارگیری حسگر، استخراج نمودار مشخصهٔ (فرکانس- سرعت ورودی) سیستم و برنامه‌نویسی یک نرم‌افزار برای پردازش سیگنال‌های دریافتی از حسگر و محاسبهٔ خودکار دبی از دیگر موارد انجام شده است. در نهایت چگونگی عملکرد دبی‌سنج در دبی‌های پایین، با توجه به بررسی اثر کلی تغییر برخی پارامترهای هندسی، مورد بررسی قرار گرفته است.

کلمات کلیدی: ۱-دبی‌سنج نوسانی ۲-شبیه‌سازی عددی جریان آشفته ۳-داده‌برداری ۴-پردازش سیگنال ۵-حسگر فشار ۶-حسگر پیزوالکتریک. ۷- طراحی آزمایش کامل

[1] Fluidic Oscillator Flow Meters

فصل اول
مقدمه

۱-۱ تعریف

از دیرباز منابع طبیعی از مواردی بوده که ارزش آن برای بشر بسیار مهم و حیاتی بوده است. با گذشت زمان و افزایش جمعیت ارزشمندی این منابع نیز بیشتر مورد توجه انسان قرار گرفته است. پس تقسیم بندی عادلانه منابع طبیعی، بدون هدر رفت زیاد، از مسائل بسیار مهمی است که بشر امروز بدان توجه بسیار دارد. آب، این ماده‌ی حیاتی که دقایق زندگی انسان به آن بستگی دارد، از جمله‌ی این منابع است. توزیع مناسب و اندازه‌گیری دقیق میزان مصرف هر مصرف کننده می‌تواند تقسیم بندی عادلانه‌تر این عطیهٔ خدادادی را فراهم سازد.

تعریف دبی: میزان حجم سیال عبوری از یک مجرا در واحد زمان را دبی می‌گویند.

تاکنون تجهیزات متعددی به منظور اندازه‌گیری دبی آب به کار گرفته شده است. هر کدام از تجهیزات ساخته شده دارای قابلیت‌ها و به تبع آن دارای کاربردهای متعددی هستند. استانداردهای معتبر بین المللی "وسایل اندازه گیری حجم آب مصرفی" را بدین صورت تعریف کرده‌اند.

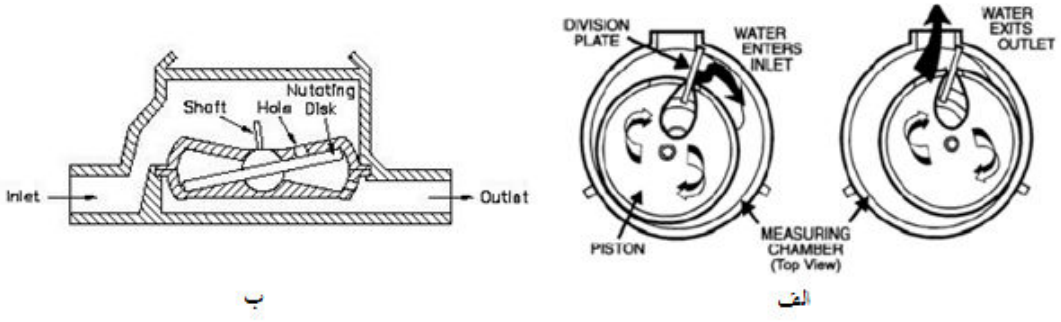
- OIML R49-1[1] : وسایل اندازه‌گیری آب وسایلی هستند که به منظور اندازه‌گیری به طور پیوسته، حفظ و نمایش حجم آب عبوری از سیستم در شرایط اندازه‌گیری، به کار می‌روند [۱].

[1] International Organization of Legal Metrology

۱-۲ روش‌های مختلف اندازه‌گیری دبی آب

با توجه به ابعاد و میزان آب مورد اندازه‌گیری و همچنین دقت لازم در اندازه‌گیری آن، از تجهیزات متفاوتی می‌توان استفاده نمود. این تجهیزات از روش‌های مختلف مکانیکی و غیر مکانیکی به منظور اندازه‌گیری حجم آب عبوری استفاده می‌کنند. برخی از روش‌هایی که تاکنون برای اندازه گیری دبی آب به کار رفته، عبارتست از:

۱-۲-۱ دبی‌سنج‌های با جابجایی مثبت (Positive Displacement Flow Meters) [۲]: در این نوع دبی‌سنج‌ها هنگامی که تحت فشار مثبت کار می‌کنند، آب با عبور از آن به طور فیزیکی یک المان اندازه‌گیر متحرک را جابجا می‌کند، به طوری که میزان جابجایی آن المان در تناسب مستقیم با مقدار جریان آب عبوری از دبی‌سنج است. این نوع دبی‌سنج‌ها در منازل مسکونی و واحدهای کوچک تجاری کاربرد دارند (شکل ۱-۱). در بخش الف این شکل جریان عبوری از سیستم پشت یک پره تقسیم‌کننده قرار گرفته و باعث حرکت چرخشی خارج از مرکزی پیستون می‌گردد. با چرخش یک دور، حجمی به اندازه فضای بین سیلندر و پیستون جاروب می‌شود که برابر همین مقدار حجم سیال عبوری است. در شکل ب نیز عبور سیال باعث حرکت دیسک متحرک در داخل محفظه‌ای با حجم مشخص می‌گردد. تعداد پر و خالی شدن محفظه مذکور در واحد زمان معرف میزان دبی عبوری است. این نوع دبی‌سنج‌ها بدون انجام کالیبراسیون از دقت مناسبی برخوردارند، اما به آلودگی آب عبوری حساس می‌باشند.

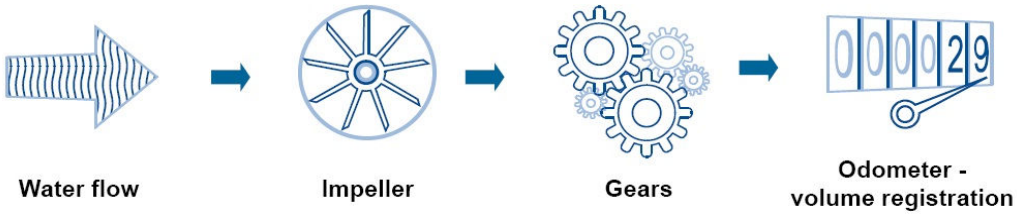


شکل ۱-۱ : دبی‌سنج‌های با جابجایی مثبت، الف) Oscillatory piston ، ب) Nutating disk [۲]

۱-۲-۲ دبی‌سنج‌های اندازه‌گیر سرعت (Velocity Flow Meters) [۲]: در این نوع دبی‌سنج‌ها با اندازه‌گیری سرعت ورودی آب از یک ورودی با اندازه سطح مشخص، دبی محاسبه می‌گردد. در واقع با افزایش سرعت آب ورودی، سرعت چرخش پره مقابل آن نیز بیشتر می شود. چرخش پره با نسبت مشخصی، توسط یک مجموعه چرخنده، باعث ثبت میزان آب مصرفی می‌گردد (شکل ۱-۲). علیرغم نوع جابجایی مثبت، این نوع دبی‌سنج‌ها نسبت به آلودگی آب عبوری حساسیت کمتری دارد. در صورتی‌که تجهیزات کالیبراسیون بر روی آن ها نصب شود دقت مناسبی خواهند داشت. جت‌های جریان ورودی و برخورد کننده به پره‌ها می‌تواند به صورت تکی[1] یا چندگانه[2] باشدکه هر کدام

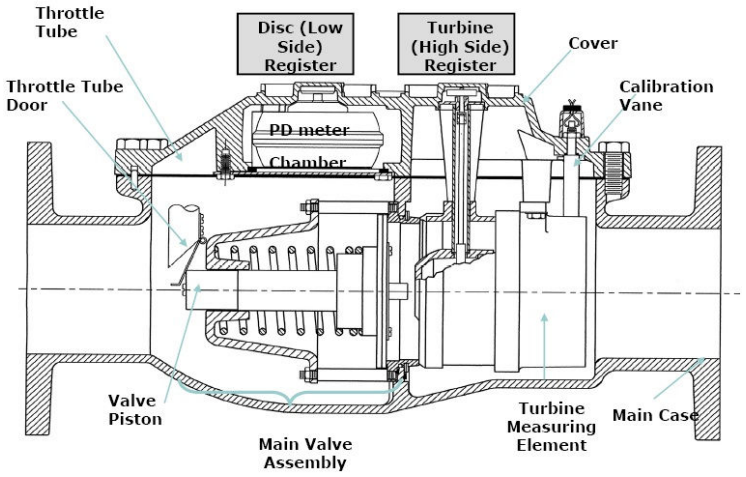
[1] Single-jet
[2] Multi-jet

مزایا و معایب خاص خود را دارند. این نوع دبی‌سنج‌ها نیز در منازل مسکونی و واحدهای کوچک تجاری کاربرد دارند.



شکل ۱-۲ : دبی‌سنج‌های با اندازه‌گیری سرعت (Velocity Meters) [۲]

۱-۲-۳ دبی‌سنج‌های ترکیبی (Compound Flow Meters) [۲]: در این نوع برای اندازه‌گیری دبی‌های بالا از یک پره توربین مانند استفاده می‌گردد. در دبی‌های پایین نیز به وسیله یک شیر تنظیم کننده، آب به طرف یک دبی‌سنج سرعتی از نوع جت چندگانه (Multi-jet) یا دبی‌سنج‌های جابجایی مثبت (PD) تغییر مسیر داده و اندازه‌گیری می‌شود (شکل ۱-۳). این نوع دبی‌سنج‌ها مخصوص اندازه‌گیری دبی در مکان‌های پر مصرف مانند اماکن صنعتی یا تجاری بزرگ می‌باشند.

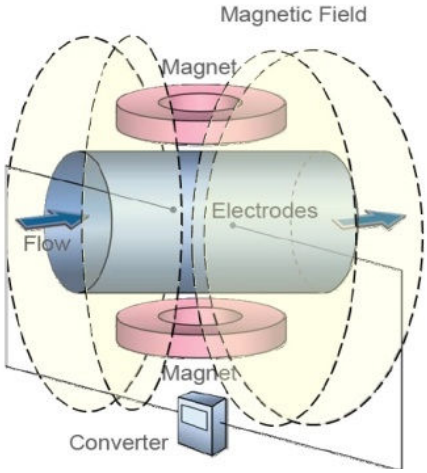


شکل ۱-۳ : دبی‌سنج ترکیبی (Compound Meter) [۲]

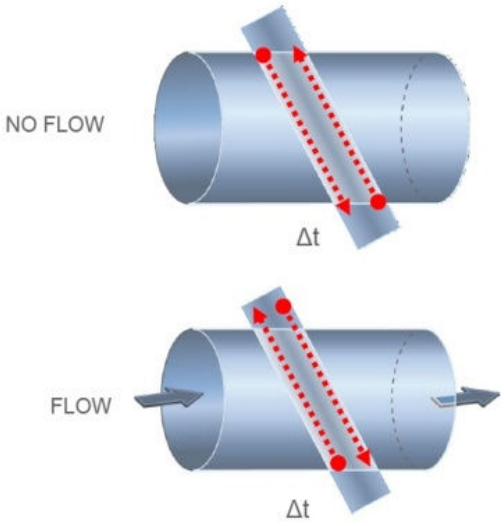
۱-۲-٤ دبی‌سنج‌های الکترومغناطیس (Electromagnetic Flow Meters) [۲]: این نوع دبی‌سنج‌ها از قانون فارادی به منظور تعیین مقدار سیال عبوری از داخل لوله استفاده می‌کنند. با ایجاد میدان مغناطیسی در مسیر عبور ماده رسانا، بر اساس قانون فارادی جریان الکتریسیته در داخل الکترودها القا می‌شود که متناسب با سرعت حرکت ماده رسانای عبوری از میدان مغناطیسی می‌باشد. این نوع فقط برای اندازه‌گیری سیالات رسانا کاربرد دارد (شکل ۱-۴). ایجاد رسوب در داخل لوله باعث تغییر در سطح مقطع لوله و به تبع آن تغییر در اندازه‌گیری دبی می‌گردد.

۱-۲-۵ دبی‌سنج‌های مافوق صوت (Ultrasonic Flow Meters) [۲]: در این نوع دبی‌سنج‌ها امواج ما فوق صوت توسط مبدل‌های مافوق صوت ارسال و دریافت می‌شود. در حالت بدون جریان، زمان یکسانی طول می‌کشد تا موج

در جریان بالادست و پایین‌دست یک رفت و برگشت در عرض لوله انجام دهد. اما در حضور جریان سیال، سرعت موج ما فوق صوت در جریان بالادست کمتر از جریان پایین‌دست است. با افزایش جریان سیال، تفاوت بین زمان‌های رفت و برگشت موج در جریان بالادست و پایین‌دست به طور خطی افزایش می یابد (شکل ۱-۵).

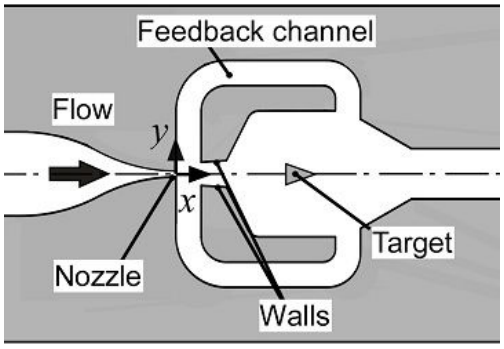


شکل ۱-۴ : دبی‌سنج الکترومغناطیس [۲]



شکل ۱-۵ : دبی‌سنج مافوق صوت [۲]

۱-۲-٦ دبی‌سنج‌های بر مبنای نوسان سیال (Fluidic Oscillator Flow Meters) [۲]: این نوع دبی‌سنج‌ها بدین صورت عمل می‌کنند که با ورود جریان سیال به محفظه سیستم و با توجه به ویژگی‌های هندسی درون آن، سیال شروع به ایجاد نوسان یا ایجاد ورتکس (Vortex) می‌کند. با افزایش سرعت جریان سیال ورودی، فرکانس نوسان نیز به طور خطی نسبت به آن افزایش می‌یابد. با اندازه‌گیری فرکانس می‌توان دبی را اندازه‌گیری کرد (شکل ۱-۶).



شکل ۱-۶ : دبی‌سنج بر مبنای نوسان سیال [۲]

هر کدام از این دبی‌سنج‌ها دارای مزایا، معایب و کاربردهایی هستند که بیان آنها به طور مبسوط در این مجال قرار نمی‌گیرد. با توجه به موضوع این تحقیق که پیرامون دبی‌سنج‌های نوسانی می‌باشد توضیحات بیشتر در مورد این نوع، در ادامه به طور مفصل ارائه می‌گردد.

۱-۳ تئوری و اصول حاکم بر مسئله

اعداد بدون بعد از جمله موارد بسیار مهم در مکانیک سیالات می‌باشد. بیان و تشریح شرایط فیزیکی سیال در حالت‌های مختلف توسط این اعداد قابل بیان است. با توجه به نوع مسئله و شرایط حاکم بر آن می‌توان اعداد بدون بعد مناسب را در نظر گرفت. با توجه به بدون بعد بودن، این اعداد خواص حاکم بر شرایط سیال را بدون وابستگی به ابعاد یا شرایط فیزیکی خاص، توضیح داده و قابل تعمیم و مقایسه می‌کند. از مهم‌ترین اعداد بدون بعد از عدد رینولدز می‌توان نام برد که تعریف آن در رابطه ۱-۱ آمده است.

$$Re = \frac{\rho V L}{\mu} \qquad ۱-۱$$

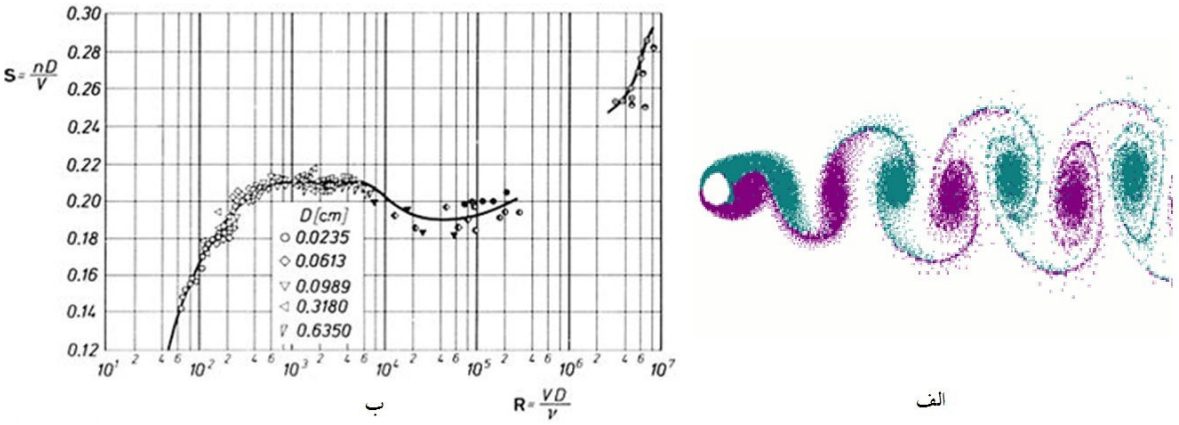
در این رابطه، ρ دانسیته ی سیال، L طول مشخصه که با توجه به کاربردی که در هندسه خاصی مد نظر است تعیین می شود، V سرعت و μ ضریب لزجت دینامیکی سیال می‌باشد. این تعریف معادل با نسبت نیروهای اینرسی به نیروهای لزج در میدان جریان سیال است. با توجه به این مفهوم، معمولا برای تشخیص آرام یا آشفته بودن جریان‌های مهندسی از این عدد استفاده می‌شود[۳].

مهم‌ترین اعداد بدون بعد مورد استفاده در این مبحث رینولدز (Re) و استروهال (St) می‌باشد. تعریف این عدد بدون بعد نیز به صورت زیر است :

$$St = \frac{fL}{V} \qquad ۱-۲$$

در این رابطه، L طول مشخصه، V سرعت سیال و f فرکانس نوسان سیال می باشد. به طور عمده در جریان‌هایی که به دلیل برخی ناپایداری‌ها نوساناتی در سیال و یا در گردابی‌های موجود در جریان به وجود می‌آید از این عدد استفاده می‌شود. همان طور که از رابطه ۱-۲ مشهود است، عدد St به نوعی بیانگر رابطه بین فرکانس نوسان موجود در سیال با سرعت آن و هندسه مجرایی که سیال در آن جریان دارد، می‌باشد.

بررسی رابطهٔ بین اعداد بدون بعد، دریچه جدیدی را برای درک عمیق‌تر شرایط و ویژگی‌های حاکم بر سیال باز می‌کند. به عنوان مثال با توجه به آزمایش‌های انجام شده، در اثر برخورد جریان سیال به یک مانع استوانه‌ای شکل، در محدوده خاصی از عدد رینولدز، سیال شروع به نوسان پایدار در پشت استوانه می‌کند. این پدیده که به نام مسیر گردابی ون کارمن[1] مشهور است، در شکل ۱-۷ الف مشاهده می‌گردد.با توجه به شکل ۱-۷ ب، اگر برای این پدیده، عدد استروهال به صورت تابعی از عدد رینولدز ترسیم شود، مشاهده می‌گردد که در محدوده خاصی از عدد رینولدز، استروهال مقدار تقریباً ثابتی را دارا خواهد بود. در این‌جا در محدوده عدد رینولدز ۳۰۰ تا ۶۰۰۰ عدد استروهال مقدار تقریبی ۰/۲۱ را به خود اختصاص داده است.



شکل ۱-۷: الف) مسیر گردابی von karman ، ب) نمودار Re-St [۳]

ثابت بودن عدد استروهال در محدوده‌ای از رینولدز، نشان دهندهٔ خاصیتی است که در ائامه بدان اشاره شده است (رابطه ۱-۳).

$$St = \frac{fL}{V} = cte \overset{L=cte}{\Longrightarrow} V \propto f \qquad ۳-۱$$

با توجه به ثابت بودن L که در این‌جا قطر استوانه است، رابطه فرکانس با سرعت به صورت خطی خواهد شد. مقادیر موجود در نمودار شکل ۱-۷ ب برای یک نوع هندسه‌ی خاص بدست آمده است. در دهه‌های اخیر هندسه‌های گوناگونی پیشنهاد شده که در آن‌ها، در محدوده وسیعی از عدد رینولدز، عدد استروهال مقدار تقریباً ثابتی را به خود اختصاص می‌دهد.

از این ویژگی در دبی‌سنج‌های نوسانی استفاده می‌شود. با توجه به شکل ۱-۶ در صورتی که سیالی با سرعت V از نازل با عرض L عبور کند به مجرای اصلی دیفیوزر شکل می‌رسد که شامل یک قطعهٔ جداکننده (مثلاً در شکل ۱-۶ target) می‌باشد. با ورود جریان سیال به مجرای اصلی جریان، توسط جداکننده، بخشی از جریان به داخل دو عدد کانال بازگشتی[2] می‌رود. خروجی این کانال‌ها به سمت نازل ورودی جریان است. در نتیجه باعث انحراف جت جریان ورودی به مجرای اصلی می‌شود. در این صورت نوسانی بین دو دیواره ایجاد شده و در طول زمان کوتاهی پایدار

[1] Von Karman Vortex Street
[2] Feedback Channel

می‌شود. نوسانی با فرکانس f که در آن، عدد استروهال در محدودهٔ عدد رینولدز سیال ورودی تقریباً ثابت است. در نتیجه سرعت ورودی در تناسب مستقیم با فرکانس نوسانات سیال خواهد بود. بنابراین، در صورت اندازه‌گیری فرکانس نوسانات جت سیال ورودی می‌توان سرعت متوسط آن را بدست آورد. در نتیجه دبی جریان عبوری (Q) از سطح مقطع A به راحتی محاسبه خواهد شد.

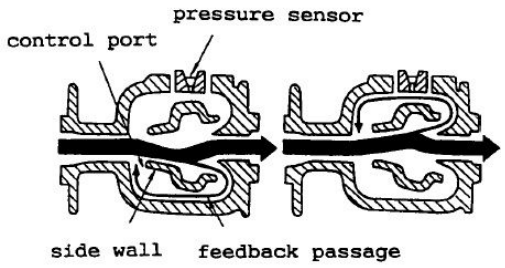
$$Q = AV \qquad ۴-۱$$

۱-٤ انواع دبی‌سنج‌های نوع نوسانی

در دهه‌های گذشته تحقیقات متعددی بدین منظور صورت گرفته که به طراحی چند نوع دبی‌سنج از این دست منجر شده است. سه نوع رایج عبارتست از :

۱-٤-۱ نوع دارای مسیر بازگشتی (Feedback type) : به منظور توضیح چگونگی عملکرد این نوع از دبی‌سنج نوسانی لازم است در ابتدا پدیده‌ای به نام اثر کواندا[1] به طور مختصر توضیح داده شود.

Henri Coanda در سال ۱۹۳۰ میلادی دریافت هنگامی که یک جت سیال وارد هندسه‌ای واگرا (مانند ورودی دیفیوزر) شود تمایل پیدا می‌کند که به یکی از دو دیواره جانبی نزدیک گردد [۴]. در این نوع، با توجه به شکل ۱-۸، با ورود سیال به هندسه مربوطه و تمایل آن به یکی از دیواره‌ها توسط اثر کواندا، مقداری از سیال وارد



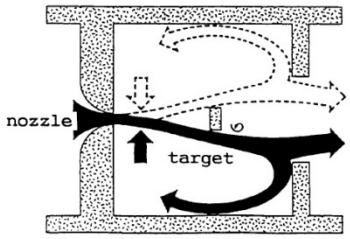
شکل ۱-۸: دبی‌سنج نوسانی نوع Feedback [۵]

جریان فیدبک می‌گردد، پس از برخورد جریان فیدبک به جت ورودی، جهت جت به سمت دیواره دیگر منحرف شده و وارد مسیر بازگشتی دیگر می‌شود؛ و این پدیده دائماً تکرار می‌گردد. همان‌طور که در شکل ۱-۸ مشاهده می‌شود می‌توان نوسانات جت سیال را توسط حسگر[2] فشار دریافت نمود.

۱-٤-۲ نوع دارای مانع (Target type) : در این حالت با برخورد جریان جت ورودی با یک مانع، جریان منحرف می‌گردد. وجود دو دیواره جداکننده[3] باعث جلوگیری از خروج بخشی از جریان از مجرای اولیه می‌شود که با توجه به شکل ۱-۹ فیدبکی در داخل جریان ایجاد خواهد شد. با توجه به عدم تقارن ذاتی جریان سیال، (به دلیل اعداد رینولدز بالا و وجود جریان توربولانس)، فیدبک‌های ایجاد شده یکسان نبوده و نتیجتاً باعث شروع نوسانی در سیال خواهند شد که پس از مدت زمان کوتاهی این نوسان پایدار می‌گردد (شکل ۱-۹).

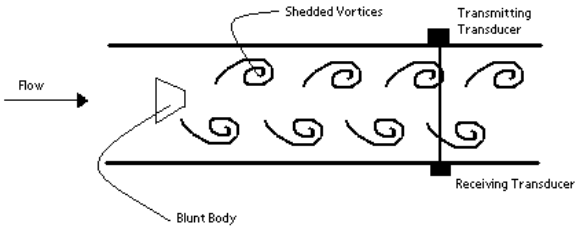
---

[1] Coanda effect
[2] Sensor
[3] Splitter wall



شکل ۱-۹: دبی‌سنج نوسانی نوع Target [۵]

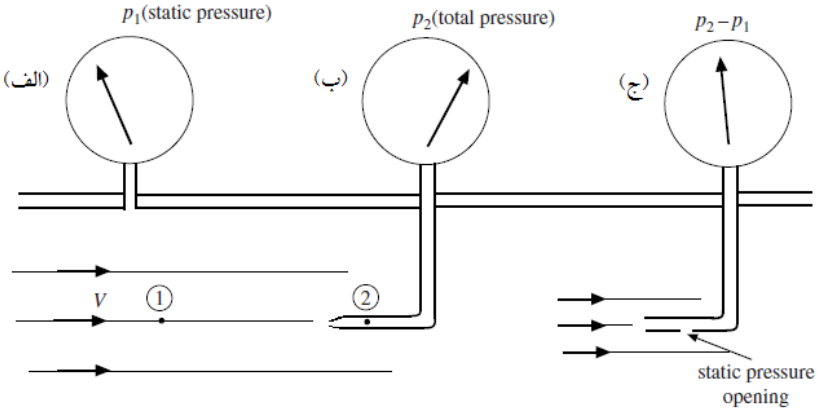
۱-٤-۳ نوع Vortex Shedding : در این حالت با برخورد جریان سیال ورودی به یک مانع[1]، در محدوده رینولدز خاصی با ایجاد گردابی ون کارمن، نوساناتی پریودیک در پایین دست جریان ایجاد می‌گردد. این نوسانات به صورت گردابه‌هایی توسط یک ارسال کننده و دریافت کننده امواج مافوق صوت قابل شمارش می باشند، که با داشتن فرکانس آن‌ها دبی جریان قابل محاسبه است (شکل ۱۰-۱).



شکل ۱-۱۰: دبی‌سنج نوسانی نوع Vortex Shedding [۵]

۱-۵ مفهوم انواع فشار در مکانیک سیالات [۶]

به خاطر استفاده از مفهوم فشار در جریان سیال بهتر است مختصری به معرفی انواع فشار پرداخته شود. در جریان سیال چند نوع فشار تعریف و اندازه‌گیری می‌شود.



شکل ۱-۱۱: انواع فشار در مکانیک سیالات الف) فشار استاتیک ب) فشار کل ج) فشار دینامیک [۶]

[1] Blunt Body