

بِسْمِ اللَّهِ الرَّحْمَنِ الرَّحِيمِ



دانشکده مهندسی مکانیک و مکاترونیک

پایان نامه کارشناسی ارشد مهندسی سیستم‌های انرژی

طراحی و ساخت دبی سنج جرمی حرارتی لوله مویی برای مصارف خانگی

نگارنده: محمد رمضانپور فومشی

استاد راهنما

دکتر محمود فرزانه‌گرد

مشاور صنعتی

مهندس سعید جمالی لیوانی

شهریور ۱۳۹۶

نام و نام خانوادگی رئیس (یا معاون آموزشی و پژوهشی) دانشکده:

تاریخ و امضاء و مهر دانشکده:

شماره: ۳۵/۲۹۶/۱۴۲

تاریخ: ۹۶/۷/۲۵

باسمه تعالی



دانشگاه شهر سوادکوه

مدیریت تحصیلات تکمیلی

فرم شماره (۳) صورتجلسه نهایی دفاع از پایان نامه دوره کارشناسی ارشد

با نام و یاد خداوند متعال، ارزیابی جلسه دفاع از پایان نامه کارشناسی ارشد آقای محمد رمضانپور فومنی با شماره دانشجویی ۹۳۰۸۵۰۴ رشته مکانیک گرایش مهندسی سیستم‌های انرژی تحت عنوان طراحی و ساخت دیسی سنج جرمی حرارتی لوله مویی برای مصارف خانگی که در تاریخ ۱۳۹۶/۰۶/۲۰ با حضور هیأت محترم داوران در دانشگاه صنعتی شاهرود برگزار گردید به شرح ذیل اعلام می‌گردد:

قبول (با امتیاز ۱۸.۶۶ درجه بسیار خوب)  مردود

نوع تحقیق: نظری  عملی

عضو هیأت داوران	نام و نام خانوادگی	مرتبه علمی	امضاء
۱- استاد راهنمای اول	دکتر محمود فرزانه کرد	استاد	
۲- استاد راهنمای دوم	_____	_____	_____
۳- استاد مشاور	_____	_____	_____
۴- نماینده تحصیلات تکمیلی	دکتر سید مجید هاشمیان	استادیار	
۵- استاد منتحن اول	دکتر محمود چهارطاقی	استادیار	
۶- استاد منتحن دوم	دکتر محمد محسن شاه‌مردان	دانشیار	

نام و نام خانوادگی رئیس دانشکده: محمد محسن شاه‌مردان

تاریخ و امضاء و مهر دانشکده:

تیسره: در صورتی که کسی مردود شود حداکثر یکبار دیگر (در مدت مجاز تحصیل) می‌تواند از پایان نامه خود دفاع نماید (دفاع مجدد نباید زودتر از ۴ ماه برگزار شود).



**"این پایان نامه با حمایت و پشتیبانی شرکت ملی گاز ایران اجرا شده است"**

## تقدیم نامہ

این اثر را به والدین عزیزم و تمام کسانی که مرا در این پروژه یاری نمودند با کمال تشکر و احترام تقدیم می نمایم.

## سپاس‌گزاری

از استاد محترم دکتر فرزانه‌گرد که در این پروژه مرا یاری نمودند کمال تشکر و قدردانی را دارم و آرزوی موفقیت برای ایشان دارم.

از مدیرعامل‌های شرکت صنعت گاز شمال و شرکت صنایع گاز تتیس که اتاق کالیبراسیون را در اختیار اینجانب گذاشتند نیز بسیار سپاسگزارم.

از زحمات مهندس محمدجواد رمضانپور جهت فراهم کردن شرایط کارگاهی بسیار سپاسگزارم.

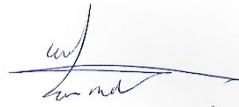
## تعهد نامه

اینجانب محمد رمضانپور فومشی دانشجوی دوره کارشناسی ارشد رشته مهندسی سیستم های انرژی دانشکده مکانیک دانشگاه صنعتی شاهرود نویسنده پایان نامه طراحی و ساخت دبی سنج جرمی حرارتی لوله مویی برای مصارف خانگی تحت راهنمایی دکتر محمود فرزانه گرد متعهد می شوم:

- تحقیقات در این پایان نامه توسط اینجانب انجام شده است و از صحت و اصالت برخوردار است.
- در استفاده از نتایج پژوهشهای محققان دیگر به مرجع مورد استفاده استناد شده است.
- مطالب مندرج در پایان نامه تاکنون توسط خود یا فرد دیگری برای دریافت هیچ نوع مدرک یا امتیازی در هیچ جا ارائه نشده است.
- کلیه حقوق معنوی این اثر متعلق به دانشگاه صنعتی شاهرود می باشد و مقالات مستخرج با نام «دانشگاه صنعتی شاهرود» و یا «Shahrood University of Technology» به چاپ خواهد رسید.
- حقوق معنوی تمام افرادی که در به دست آمدن نتایج اصلی پایان نامه تأثیرگذار بوده اند در مقالات مستخرج از پایان نامه رعایت می گردد.
- در کلیه مراحل انجام این پایان نامه، در مواردی که از موجود زنده (یا یافته های آنها) استفاده شده است ضوابط و اصول اخلاقی رعایت شده است.
- در کلیه مراحل انجام این پایان نامه، در مواردی که به حوزه اطلاعات شخصی افراد دسترسی یافته یا استفاده شده است اصل رازداری، ضوابط و اصول اخلاق انسانی رعایت شده است.

تاریخ ۱۳۹۶/۰۶/۲۰

امضای دانش



### مالکیت نتایج و حق نشر

- کلیه حقوق معنوی این اثر و محصولات آن (مقالات مستخرج، کتاب، برنامه های رایانه ای، نرم افزارها و تجهیزات ساخته شده است) متعلق به دانشگاه صنعتی شاهرود می باشد. این مطلب باید به نحو مقتضی در تولیدات علمی مربوطه ذکر شود.
- استفاده از اطلاعات و نتایج موجود در پایان نامه بدون ذکر مرجع مجاز نمی باشد.

\* متن این صفحه نیز باید در ابتدای نسخه های تکثیر شده پایان نامه وجود داشته باشد.

## چکیده

در همه‌ی صنایع، آزمایشگاه‌های مراکز ملی کشور، واحدهای تحقیقاتی دانشگاه‌ها، نیروگاه‌ها و به عبارتی تمامی ارگان‌هایی که از دبی‌سنج استفاده می‌نمایند، استفاده از یک دبی‌سنج دقیق غیرقابل‌اجتناب می‌باشد و مسئله اندازه‌گیری بحث مهمی تلقی می‌شود. یکی از مصارف مهم دبی‌سنج‌ها، مصارف گاز خانگی می‌باشد که بخش قابل‌توجهی از مصرف گاز کشور به آن اختصاص می‌یابد. لذا طراحی و ساخت یک دبی‌سنج با دقت اندازه‌گیری قابل قبول ضروریست. در میان انواع موجود دبی‌سنج‌های مختلف، دبی‌سنج‌های جرمی حرارتی لوله مویی دارای دقت اندازه‌گیری بالا در شرایط مختلف عملکردی می‌باشند. این نوع دبی‌سنج نسبت به دبی‌سنج‌های دیافراگمی موجود از ساختار ساده‌تر، اجزای غیرمتحرک، تعمیرات دوره‌ای کمتر و نیز دقت بیشتری برخوردار است. این دبی‌سنج بر اساس قانون اول ترمودینامیک عمل می‌کند و از یک المنت حرارتی در وسط و دو حسگر قبل و بعد المنت حرارتی بر روی لوله حسگر و بخش آرام ساز تشکیل شده است. به این صورت که با اعمال شار حرارتی به لوله حسگر و محاسبه میزان اختلاف دما در اثر عبور جریان برای محاسبه دبی سیال استفاده می‌شود. برای محاسبه اختلاف دما مدار الکترونیکی AVR طراحی شده است که با کدنویسی به زبان C و برنامه CodeVisionAVR Advanced 3.12 در IC برنامه‌ریزی شده است. از حسگر مقاومتی PT100 برای حس کردن دما بر روی لوله حسگر نیز استفاده شده است. طراحی و ساخت این نوع دبی‌سنج مطابق استانداردهای ملی گاز و با تجهیزات و امکانات موجود در بازار می‌باشد. پس از کالیبراسیون دبی‌سنج ساخته شده، به بحث و بررسی نتایج حاصل، محاسبه عدم قطعیت موجود در اندازه‌گیری و همچنین محدوده‌ی عملکرد قابل استناد دبی‌سنج پرداخته شد. ضریب کالیبراسیون بدست آمده برابر ۰,۰۸ می‌باشد و دبی‌سنج تا دبی ۱,۲ متر مکعب بر ساعت قابل استفاده می‌باشد.

**کلمات کلیدی:** دبی‌سنج جرمی حرارتی، لوله مویی، انتقال حرارت، گاز خانگی، کالیبراسیون، عدم قطعیت



## مقالات

رضانپورفومشی م.، فرزانه‌گرد م.، جمالی‌لیوانی س. و نمار م.، ۱۳۹۶؛ طراحی و ساخت دی‌سنج  
جرمی حرارتی لوله مویی برای اندازه‌گیری مصرف گاز خانگی؛ دومین کنفرانس ملی تحقیقات بین  
رشته‌ای در مهندسی کامپیوتر، برق، مکانیک و مکاترونیک؛ قزوین؛ ۱۳۹۶

## فهرست عناوین

فصل اول: مقدمه.....	۱
۱-۱- مقدمه.....	۲
۱-۲- آرام یا آشفته بودن جریان.....	۳
۱-۳- اندازه گیری دبی.....	۴
۱-۴- روش های اندازه گیری دبی.....	۵
۱-۴-۱- روش های استنتاجی.....	۵
۱-۴-۲- روش های جابجایی مثبت.....	۶
۱-۴-۳- روش اندازه گیری جرم.....	۶
۱-۵- انواع دبی سنج حرارتی.....	۷
۱-۵-۱- گرم کننده غوطه ور.....	۷
۱-۵-۲- جریان سنج سیم داغ.....	۸
۱-۵-۳- دبی سنج حرارتی لوله مویی.....	۹
فصل دوم: تئوری روش ها.....	۱۱
۲-۱- مقدمه.....	۱۲
۲-۲- دبی سنج حرارتی لوله مویی.....	۱۴
۲-۳- حسگر دما.....	۲۱
۲-۳-۱- روش مکانیکی.....	۲۱
۲-۳-۲- روش تشعشعی.....	۲۲
۲-۳-۳- روش الکتریکی.....	۲۲
۲-۴- مدارهای الکترونیکی.....	۲۴
۲-۵- کالیبراسیون و عدم قطعیت.....	۲۶
۲-۶- مفهوم عدم قطعیت در اندازه گیری.....	۲۶

۲۸	..... ۲-۶-۱-عدم قطعیت مبسوط
۲۸	..... ۲-۷-روش‌های کالیبراسیون دبی سنج گاز
۲۹	..... ۲-۷-۱-روش جابجایی
۳۱	..... ۲-۷-۲-روش حجمی و وزنی
۳۱	..... ۲-۷-۳-روش جابجایی گاز
۳۲	..... ۲-۷-۴-روش نازل صوتی
۳۵	..... فصل سوم: طراحی
۳۶	..... ۳-۱-طراحی و مشخصات طرح
۳۷	..... ۳-۲-لوله‌ی حسگر
۳۹	..... ۳-۳-لوله آرام‌ساز
۴۲	..... ۳-۴-حسگر دما
۴۳	..... ۳-۵-مدار الکترونیکی
۴۴	..... ۳-۶-منبع تغذیه
۴۵	..... ۳-۷-المنت حرارتی
۴۵	..... ۳-۸-کدنویسی مدار
۴۷	..... ۳-۹-نحوه کار مدار الکترونیکی
۴۷	..... ۳-۱۰-نحوه کالیبراسیون مدار الکترونیکی
۴۹	..... ۳-۱۱-تجهیزات کالیبراسیون
۴۹	..... ۳-۱۲-شرایط و استانداردهای کالیبراسیون
۵۴	..... ۳-۱۳-مشخصات بل پرور
۵۷	..... فصل چهارم: نتایج
۵۸	..... ۴-۱-مقدمه
۵۸	..... ۴-۲-نحوه کالیبراسیون دبی سنج

۵۸	۳-۴- ثابت کالیبراسیون.....
۶۰	۴-۴- میزان و نحوه محاسبه خطا.....
۶۲	۴-۵- حساسیت پذیری.....
۶۳	۴-۶- تحلیل و بررسی نتایج.....
۶۸	۴-۷- عدم قطعیت دبی سنج.....
۷۱	فصل پنجم: نتیجه گیری.....
۷۲	۵-۱- نتیجه گیری.....
۷۲	۵-۲- پیشنهادهای کار آینده.....
۷۵	پیوست.....
۷۶	پیوست ۱_ کد مدار الکترونیکی.....
۹۶	پیوست ۲_ تصویر گواهی کالیبراسیون دماسنج مرجع و نمایشگر آن.....
۹۸	پیوست ۳_ تصویر نقشه مدار الکترونیکی.....
۹۹	منابع.....

## فهرست شکل

- شکل ۱-۱: شکل شماتیک دبی سنج جرمی حرارتی غوطه‌ور [۵] ..... ۷
- شکل ۱-۲: حسگرهای CTA، انواع پراپ از چپ بالا به صورت ساعت‌گرد، حسگر سیمی، حسگر سیمی روکش طلا، حسگر فیلم فیبر، حسگر فیلم [۸] ..... ۹
- شکل ۳-۱: شکل شماتیک دبی سنج جرمی حرارتی لوله مویی [۹] ..... ۱۰
- شکل ۱-۲: طرح شماتیک دبی سنج جرمی حرارتی لوله مویی [۴] ..... ۱۵
- شکل ۲-۲: نمودار کیفی تغییرات اختلاف دما در لوله‌ی حسگر در دبی سنج [۹] ..... ۱۷
- شکل ۳-۲: نمودار مقایسه نتایج شبیه‌سازی با کار آزمایشگاهی [۴] ..... ۱۸
- شکل ۴-۲: نمودار مقایسه تأثیر قطر داخلی و طولی (به ترتیب سمت چپ و راست) بر خطی بودن نسبت بین دبی و اختلاف دما [۴] ..... ۱۸
- شکل ۵-۲: نمودار خطی بودن با قطر داخلی ۱,۴۵ میلی‌متر و طول ۷۵ میلی‌متر [۴] ..... ۱۹
- شکل ۸-۲: نمودار مقایسه نتایج عددی و آزمایشگاهی زمان پاسخگویی برای لوله با قطر خارجی ۰,۸ و ۱,۲ به ترتیب از چپ به راست. [۱۷] ..... ۲۱
- شکل ۹-۲: تغییر ولتاژ حسگرهای الکتریکی نسبت به دما [۱۹] ..... ۲۳
- شکل ۱۰-۲: مقایسه بین حسگرهای RTD، ترموکوپل و ترمیستور [۱۹] ..... ۲۴
- شکل ۱۱-۲: طرح شماتیک دبی سنج mercury seal prover [۲۱] ..... ۲۹
- شکل ۱۲-۲: طرح شماتیک دبی سنج Soap film burette [۲۱] ..... ۳۰
- شکل ۱۳-۲: طرح شماتیک دبی سنج بل پرور [۲۱] ..... ۳۱
- شکل ۱۴-۲: طرح شماتیک نازل صوتی [۲۱] ..... ۳۳
- شکل ۱-۳: کانتور دما در لوله‌ی حسگر با سرعت جریان ۰,۵ متر بر ثانیه ..... ۳۸
- شکل ۲-۳: مقادیر اختلاف دما در دبی حداکثر برای جنس‌های مختلف ..... ۳۹
- شکل ۳-۳: تصویر لوله‌ی حسگر ساخته‌شده از استیل ..... ۳۹
- شکل ۴-۳: تصویر لوله مسی بخش آرام‌ساز با قطر خارجی ۶ میلی‌متر ..... ۴۰
- شکل ۵-۳: تصویر بخش مکانیکی دبی سنج ساخته‌شده ..... ۴۰

- شکل ۳-۶: تغییرات مقاومت حسگر نسبت به دما [۲۴]..... ۴۲
- شکل ۳-۷: تصویر حسگر pt100 استفاده شده در دبی سنج [۲۴]..... ۴۳
- شکل ۳-۸: تصویر سخت افزار مدار الکترونیکی دبی سنج..... ۴۴
- شکل ۳-۹: تصویر منبع تغذیه..... ۴۵
- شکل ۳-۱۰: فلوجارت برنامه مدار الکترونیکی..... ۴۶
- شکل ۳-۱۱: تصویر دماسنج و نمایشگر..... ۴۷
- شکل ۳-۱۲: تصویر تجهیزات میز کالیبراسیون..... ۴۹
- شکل ۳-۱۳: کاتالوگ بل پرور استفاده شده در کالیبراسیون [۲۷]..... ۵۶
- شکل ۴-۱: نمودار مربوط با کالیبراسیون دبی سنج..... ۵۹
- شکل ۴-۲: نمودار تعیین ثابت کالیبراسیون..... ۶۰
- شکل ۴-۳: نمودار میزان حساسیت دبی سنج..... ۶۲
- شکل ۴-۴: تصویر لوله ی حسگر [۵]..... ۶۵
- شکل ۴-۵: تصویر شماتیک دبی سنج [۵]..... ۶۶
- شکل ۴-۶: نمایی از دبی سنج با لوله حسگر مسی و محیط کالیبراسیون..... ۶۷
- شکل ۴-۷: نمودار نتایج کالیبراسیون برای دبی سنج با لوله حسگر مسی..... ۶۷
- شکل ۴-۸: تغییرات تلورانس محاسبه دما برای حسگر pt100 [۲۵]..... ۶۸

## فهرست جدول

- جدول ۳-۱- محاسبات مربوط به قطر لوله‌ها و عدد رینولدز..... ۳۶
- جدول ۳-۲- روابط بین دبی عبوری و عدد رینولدز در لوله‌ی حسگر و آرام‌ساز..... ۴۱
- جدول ۳-۳- مقادیر دبی حداکثر برای انواع کنتور [۲۶]..... ۵۳
- جدول ۳-۴- میزان حداکثر خطای مجاز برای کنتور [۲۶]..... ۵۴
- جدول ۳-۵- سائز اتصالات دستگاه برای کنتورهای مختلف [۲۶]..... ۵۴
- جدول ۴-۱- نتایج کالیبراسیون دبی سنج با لوله حسگر استیل..... ۵۹
- جدول ۴-۲- محاسبه خطا دبی سنج به درصد..... ۶۱
- جدول ۴-۳- محاسبه خطا دبی سنج به لیتر..... ۶۱
- جدول ۴-۴- میزان حساسیت پذیری دبی سنج..... ۶۲
- جدول ۴-۵- مشخصات فنی و دمایی المنت و لوله‌ی حسگر..... ۶۴
- جدول ۴-۶- نتایج کالیبراسیون دبی سنج با لوله حسگر مس..... ۶۷

## فهرست نشانه

$d_s$	قطر داخلی لوله‌ی حسگر	$Re$	رینولدز
$c$	ثابت کالیبراسیون	$\rho$	چگالی
$\Delta T$	اختلاف دما	$v$	سرعت
$S$	میزان حساسیت	$d$	قطر داخلی
$L_s$	فاصله محل حسگر در پایین دست	$\mu$	ویسکوزیته
$-L_s$	فاصله محل حسگر در بالا دست	$Q$	دبی حجمی
$u(y)$	عدم قطعیت	$\dot{m}$	دبی جرمی
$u_k(y)$	عدم قطعیت هر جز	$A$	سطح مقطع جریان
$c_k$	ضریب متغیر	$\dot{m}_t$	دبی کل عبوری
$t$	زمان	$\dot{m}_1$	دبی عبوری از لوله‌ی حسگر
$C_d$	ضریب تخلیه	$\dot{m}_2$	دبی عبوری در آرام‌ساز
$C^*$	فاکتور بحرانی جریان	$\Delta p_s$	افت فشار در لوله‌ی حسگر
$A_t$	سطح مقطع گلویی نازل	$l$	طول لوله
$P$	فشار مطلق جریان در بالا دست	$\pi$	عدد پی
$T$	دمای مطلق بالا دست	$D_{in}$	قطر داخلی
$\dot{m}_{LFE}$	دبی آرام‌ساز	$\Delta p_{LFE}$	افت فشار در آرام‌ساز
$\dot{m}_{sensor\ tube}$	دبی لوله‌ی حسگر	$N$	تعداد لوله
$C$	ظرفیت گرمایی ویژه	$h_f$	افت هیدرولیکی فشار در جریان آرام
$\dot{Q}$	شار حرارتی	$g$	گرانش
$\dot{m}_{total}$	دبی جرمی کل	$v_{LFE}$	سرعت در آرام‌ساز
$e$	خطای اندازه‌گیری	$d_{LFE}$	قطر داخلی لوله آرام‌ساز



$Q_{max}$	دبی حداکثر عبوری از کنترلر	$Q_p$	دبی قرائت شده کنترلر طراحی شده
$Q_{min}$	دبی حداقل عبوری از کنترلر	$Q_m$	دبی واقعی کنترلر مرجع
		$Q_i$	دبی عبوری از کنترلر آزمون



## فصل اول: مقدمه

اندازه‌گیری دبی بحث مهمی در صنایع می‌باشد. میزان مصرف، تنظیم مواد ورودی به دستگاه‌ها، کنترل کیفی و عملکرد فرآیندهای پیوسته همگی با اندازه‌گیری درست دبی میسر است.

مهندسين و متخصصين در حرفه اندازه‌گیری همیشه به دنبال ساخت دبی‌سنجی بودند که بتواند بازه اندازه‌گیری بالا با دقت زیاد در فشار و دمای کاری متفاوت، سازگاری با هر نوع سیالی (مایع، گاز، مخلوط گاز و مایع بدون کالیبراسیون مجدد)، استحکام بالا و دوام زیاد نسبت به تغییرات شرایط کاری، نصب آسان و حداقل تعمیرات موردنیاز را داشته باشد. [۱]

با توجه به نوع مواد و شرایط آن به روش‌های متفاوتی می‌توان دبی مواد را اندازه گرفت که از این شرایط می‌توان به نوع دبی، حجم، تغییرات فشار و دما، دقت و کنترل موردنیاز اشاره نمود. روش‌های اندازه‌گیری دبی مختلفی که هم دقیق باشند و هم قابل‌اعتماد وجود دارد. بعضی از این روش‌ها فقط برای مایعات مناسب‌اند و دسته‌ای دیگر فقط برای گازها استفاده می‌شوند و تعدادی دیگر نیز وجود دارد که می‌توانند با هر دو نوع کار کنند. سیالات می‌توانند ویژگی‌های مختلفی داشته باشند مانند شفاف یا کدر، خشک یا مرطوب، کثیف یا تمیز، خورنده یا ساینده. همچنین ممکن است سیال با ویسکوزیته متغیر، با تغییرات فشار و دما بسیار زیاد در زمان‌های مختلف ظاهر شود و یا جریان سیال آرام یا آشفته باشد. تغییرات دبی ممکن است چند قطره در ساعت تا هزارها لیتر بر دقیقه متفاوت باشد. در مجموع شرایط و نیازهای مختلف کاری باید مشخص باشد تا بتوانیم انتخاب صحیحی و دقیقی در گزیدن روش اندازه‌گیری دبی داشته باشیم. [۲]

در یک کاربرد خاص با توجه به شرایطی که دارد لازم است تعدادی از مفاهیم و مشخصه‌هایی از سیال و دبی آن تعریف کنیم تا بتوانیم بهترین روش اندازه‌گیری دبی را انتخاب نماییم. که این مفاهیم عبارت‌اند از: آرام یا آشفته بودن جریان، لزجت، چگالی دما و فشار، تراکم‌پذیری و غیره.

## ۱-۲- آرام<sup>۱</sup> یا آشفته<sup>۲</sup> بودن جریان

جریانی را جریان آرام می‌نامیم که سرعت حرکت سیال در لوله‌ی یکنواخت بسیار پایین باشد. جهت حرکت ذرات سیال مستقیم و در راستای لوله می‌باشد. پروفیل سرعت آن در حالت توسعه‌یافته به این شکل است که بیشترین سرعت را در مرکز لوله خواهیم داشت و سرعت سیال در مجاورت دیواره لوله به صورت تئوری صفر است. حال اگر سرعت جریان به‌طور آهسته افزایش یابد که در یک بازه کوچک از سرعت که سرعت بحرانی نام دارد، حرکت تصادفی سیال افزایش یافته و جریان آرام به جریان آشفته تبدیل می‌شود. به جریانی با سرعت بیشتر از سرعت بحرانی جریان آشفته می‌گویند. [۳]

سرعت بحرانی وابسته به فاکتورهای مختلفی می‌باشد که از این‌رو از عدد بی‌بعدی به نام رینولدز برای تشخیص نوع جریان استفاده می‌شود که برای لوله دایروی عدد رینولدز به صورت زیر محاسبه می‌شود:

$$Re = \frac{\rho v d}{\mu} \quad (1-1)$$

که در آن:

Re: عدد رینولدز

$\rho$ : چگالی سیال (کیلوگرم بر مترمکعب)

$v$ : سرعت سیال (متر بر ثانیه)

$d$ : قطر لوله (متر)

$\mu$ : لزجت سیال (پاسکال ثانیه)

---

<sup>۱</sup> Laminar

<sup>۲</sup> Turbulence

برای جریان در لوله‌ها اگر عدد رینولدز کمتر از ۲۱۰۰ باشد جریان آرام فرض می‌شود و اگر بالای ۴۰۰۰ باشد جریان درهم می‌باشد، و نیز به جریان‌هایی با عدد رینولدز بین ۲۱۰۰ تا ۴۰۰۰ جریان گذرا گفته می‌شود که خواص آن نه کاملاً شبیه جریان آرام و نه شبیه حالت جریان آشفته است. [۳]

### ۱-۳-اندازه‌گیری دبی

اندازه‌گیری دبی می‌تواند به دو شکل باشد: ۱- مقدار دبی و ۲- کل دبی

مقدار دبی با مشخصه‌های زیر تعیین می‌شود:

۱- مقدار دبی حجمی عبوری

۲- مقدار دبی جرمی عبوری

۳- مقدار سرعت سیال در راستای معین

کل دبی می‌تواند به دو صورت انجام شود:

۱- کل حجم ۲- کل جرم

که برای سیالات غیرقابل تراکم کل حجم و کل جرم از روابط زیر به دست می‌آید:

$$\text{کل حجم} = \int Q dt = \int (Av) dt \quad (2-1)$$

$$\text{کل جرم} = \int m dt = \rho \int Q dt \quad (3-1)$$

که در آن  $m, v, A, Q$  به ترتیب دبی حجمی، سطح مقطع عبوری، سرعت سیال، دبی جرمی سیال می‌باشند.

بنابراین دبی سنج یا دبی لحظه‌ای را اندازه می‌گیرد و یا مقدار کل دبی عبوری را نشان می‌دهد.

## ۱-۴-روش‌های اندازه‌گیری دبی

دبی‌سنج‌های لحظه‌ای را می‌توان به سه دسته تقسیم کرد:

۱- استنتاجی<sup>۱</sup>

۲- جابجایی مثبت<sup>۲</sup>

۳- اندازه‌گیری جرم<sup>۳</sup>

### ۱-۴-۱-روش‌های استنتاجی

شمار زیادی از دبی‌سنج‌ها به وسیله اندازه‌گیری استنتاجی نتایج خود را به دست می‌آورند. در این روش دبی مستقیماً اندازه گرفته نمی‌شود بلکه با اندازه‌گیری پارامترهای دیگر دبی را محاسبه می‌کنند که این پارامترها عبارت‌اند از: دما، فشار، جابجایی، نیرو و ... این پارامترها توسط حسگرها<sup>۴</sup> اندازه گرفته سپس تبدیل به سرعت می‌شوند. با توجه به فرمول دبی حجمی با داشتن سطح مقطع و سرعت سیال دبی حجمی را محاسبه کرد. و نیز با انتگرال‌گیری در بازه زمانی معین می‌توان دبی حجمی کل را به دست آورد. در روش استنتاجی برای اندازه‌گیری دبی می‌توان از مدل‌های زیر استفاده کرد:

۱- ارتفاع<sup>۵</sup>: با توجه به اختلاف فشار اندازه‌گیری شده در میان یک گلوبی مهندسی شده دبی محاسبه می‌شود.

۲- مغناطیس‌سنج<sup>۶</sup>: در این نوع دبی از سرعت به دست می‌آید.

---

<sup>۱</sup> Inferential

<sup>۲</sup> Positive displacement

<sup>۳</sup> Mass measurement

<sup>۴</sup> Sensors

<sup>۵</sup> Head type

<sup>۶</sup> Magnetic meter

۳- سطح متغیر (روتامتر<sup>۱</sup>): با استفاده از جابجایی جسمی که از برآیند نیروی وزن و نیروی سرعت ایجاد شده است می‌توان دبی را به‌دست آورد.

۴- دبی‌سنج حرارتی: می‌توان از خواص حرارتی دبی را حساب کرد.

۵- دبی‌سنج توربینی<sup>۲</sup>: از سرعت سیال دبی به‌دست می‌آید.

۶- دبی‌سنج نشانه‌ای<sup>۳</sup>: با استفاده از یک نیروسنج دبی را حساب می‌کند.

۷- دبی‌سنج صوتی<sup>۴</sup>: در این دبی‌سنج با استفاده از امواج صوتی و اثر داپلر دبی به‌دست می‌آورد.

۸- دبی‌سنج چرخشی<sup>۵</sup>: دبی با توجه به نوسانات دما و فشار به‌دست می‌آید.

#### ۱-۴-۲- روش‌های جابجایی مثبت

این روش همانند پمپ با گرفتن و آزاد کردن حجم ثابتی از سیال کار می‌کند که این عمل با دیافراگم<sup>۶</sup>، پیستون رفت و برگشتی و یا پره چرخنده انجام می‌پذیرد. در این روش اغلب کل حجم سیال عبوری را اندازه‌گیری می‌کند. قابل‌ذکر است که این دبی‌سنج‌ها از نوع دبی‌سنج حجمی می‌باشند و در صورتی که چگالی سیال ثابت باشد می‌تواند به‌عنوان دبی‌سنج جرمی عمل کند.

#### ۱-۴-۳- روش اندازه‌گیری جرم

در روش اندازه‌گیری جرم در واقع حجم سیال عبوری را در چگالی‌اش ضرب کرده تا دبی جرمی به‌دست آید. البته قابل‌ذکر است که این روش زمانی قابل‌استفاده است که چگالی سیال ثابت باشد به خاطر اینکه گازها و بخارها از دما و فشار تأثیر بسیار می‌گیرند. بنابراین دبی‌سنج جرمی به ندرت در

---

<sup>۱</sup> Rotameter

<sup>۲</sup> Turbin meter

<sup>۳</sup> Target meter

<sup>۴</sup> Sonic meter

<sup>۵</sup> Swirl meter

<sup>۶</sup> Diaphragm

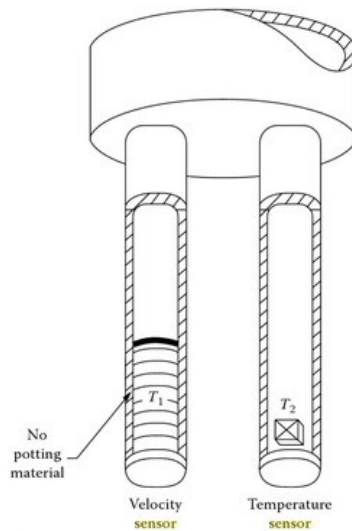


بخش‌های صنعتی مشاهده می‌شود. در صورتی که دما و فشار تغییر کند باید برای اندازه‌گیری جرم از ضریب تصحیح استفاده شود.

## ۱-۵- انواع دبی‌سنج حرارتی

### ۱-۵-۱- گرم‌کننده غوطه‌ور<sup>۱</sup>

در این دبی‌سنج مطابق شکل یک حسگر سرعت داغ شده به حالت غوطه‌ور در داخل جریان قرار می‌گیرد و با سیال مجار خود را انتقال حرارت می‌دهد و باعث گرم شدن آن می‌شود و بعد آن یک حسگر دما قرار دارد که دمای سیال گرم شده را بعد از طی فاصله مشخص اندازه می‌گیرد. دمای کاری در این دبی‌سنج نباید بالا باشد و نیز سیال نباید رسانای حرارتی باشد. معمولاً از این دبی‌سنج برای جریان‌های بالا استفاده می‌شود. [۴]



شکل ۱-۱: شکل شماتیک دبی‌سنج گرمی حرارتی غوطه‌ور [۵]

این نوع دبی‌سنج به دو دسته تقسیم می‌شود:

<sup>۱</sup> Immersible

۱- دبی‌سنج حرارتی با اختلاف دمای ثابت: در این حالت دما در سطح المان حرارتی ثابت نگه داشته می‌شود که با یک سیستم کنترلی به‌واسطه تغییرات جریان الکتریکی دما را ثابت نگه می‌دارند. با این کار مقاومت الکتریکی المان ثابت می‌ماند و جریان در مدار تغییر می‌کند که در نتیجه گرمای الکتریکی در سیستم تغییر کرده که همین امر منجر به تغییر ضریب انتقال حرارت جابجایی شده و ما می‌توانیم از روی آن سرعت سیال را به‌دست آوریم. [۶]

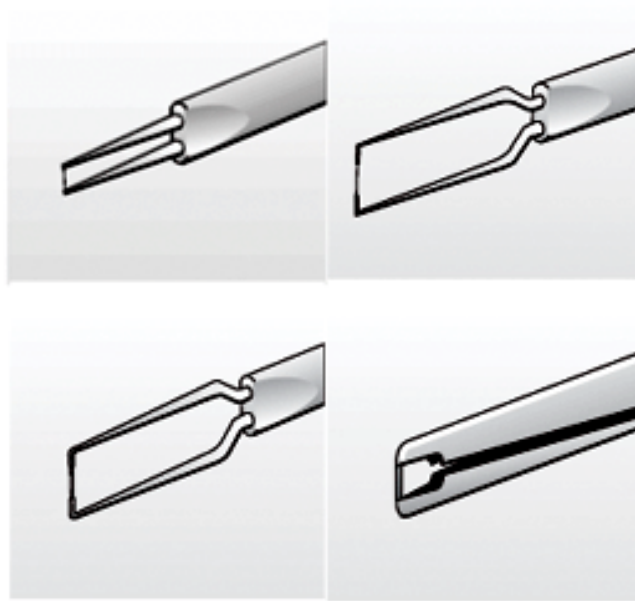
۲- دبی‌سنج حرارتی با جریان ثابت<sup>۱</sup>: در این نوع با ثابت نگه‌داشتن جریان الکتریکی، ولتاژ گرمای ورودی به سیستم ثابت خواهد بود و از تغییرات مقاومت الکتریکی المان می‌توان تغییرات سرعت را به‌دست آورد. معادله بالانس انرژی این حالت را می‌توان برحسب سرعت و اختلاف‌پتانسیل بنویسیم. [۷]

### ۱-۵-۲- جریان‌سنج سیم داغ

اساس کار این دبی‌سنج همانند دبی‌سنج حرارتی است که علاوه بر محاسبه سرعت کلی می‌توان سرعت در جهت‌های مختلف توسط المان‌های سیم داغ و سرعت در لایه‌مرزی را هم به‌دست آورد. در شکل زیر نمونه‌هایی از المان‌های حرارتی آمده است. [۸]

---

<sup>۱</sup> Constant current



شکل ۱-۲: حسگرهای CTA، انواع پراپ<sup>۱</sup> از چپ بالا به صورت ساعت گرد، حسگر سیمی<sup>۲</sup>، حسگر سیمی روکش طلا<sup>۳</sup>، حسگر فیلم فیبر<sup>۴</sup>، حسگر فیلم<sup>۵</sup> [۸]

### ۱-۵-۳-دبی سنج حرارتی لوله مویی<sup>۶</sup>

در این نوع دبی سنج گاز از دو مسیر عبور می کند. مسیر اصلی که قسمت اعظم سیال از آن عبور کرده و مسیر فرعی که مقدار کمی از سیال از آن عبور می کند، که به مسیر فرعی لوله‌ی حسگر گفته می شود و وظیفه محاسبه دبی را دارد. این دبی سنج برای دبی های بسیار پایین کاربرد دارد. شکل شماتیک<sup>۷</sup> آن به صورت زیر می باشد. [۴]

<sup>۱</sup> Prop

<sup>۲</sup> Wire sensor

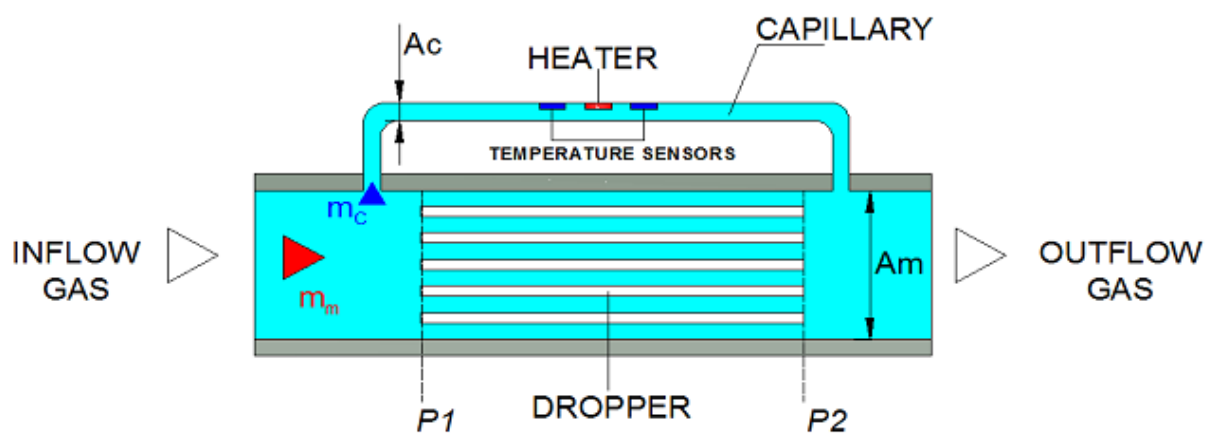
<sup>۳</sup> Gold plated wire sensor

<sup>۴</sup> Fiber film sensor

<sup>۵</sup> Film sensor

<sup>۶</sup> Capillary tube thermal mass flow meter

<sup>۷</sup> Schematic



شکل ۱-۳: شکل شماتیک دبی‌سنج جرمی حرارتی لوله مویی [۹]

دبی‌سنج ساخته‌شده در این پروژه از این نوع می‌باشد که در فصل بعدی به تفصیل بررسی خواهد شد.

## فصل دوم: تئوری روش‌ها

مطالعات بر روی دبی‌سنج حرارتی ابتدا توسط توماس<sup>۱</sup> آغاز شد. سپس کومیا<sup>۲</sup> به همراه همکاران حل یک‌بعدی در حالت پایا ارائه کردند. در این حل از اختلاف دمای شعاعی و انتقال حرارت هدایت محوری در لوله‌ی حسگر<sup>۳</sup> صرف‌نظر شده است. همچنین برای سادگی فرضیه شرایط گرمادهی در طول لوله‌ی حسگر را ثابت فرض نمودند. [۱۰] بیشتر مطالعات انجام‌شده در حالت پایا می‌باشد و کمتر به مطالعات انتقال حرارت گذرا در لوله‌ی حسگر پرداختند که در آن هم فقط به ارزیابی کیفی بسنده کردند. در این میان می‌توان به دو روش حرارت از دست رفته را محاسبه نمود. روش اول اختلاف دمای ثابت نام دارد که در این روش نرخ جریان جرمی تابعی از منبع تغذیه الکتریکی موردنیاز برای ثابت نگه داشتن اختلاف دماست. [۶] روش دوم نیز جریان ثابت نام دارد که اساس محاسبه جریان در این روش جریان ثابت الکتریکی است و نرخ جریان تابعی از اختلاف دمای بین دو حسگر است. [۷] کیم<sup>۴</sup> و جانگ<sup>۵</sup> سال ۲۰۰۱ در شرایط پایا هدایت عددی و تحقیقات تجربی را تا پی بردن کامل به تبادل انتقال حرارت بین لوله‌ی حسگر و سیال موردنظر انجام دادند. [۱۱] سپس در سال ۲۰۱۵ فرزانه‌گرد<sup>۶</sup> و همکاران به تحلیل و شبیه‌سازی دوبعدی و سه‌بعدی دبی‌سنج حرارتی لوله مویی با نرم‌افزار فلونت شدند و نتایج خود را با نتایج آزمایشگاهی کیم و جانگ مقایسه کردند که مطابقت خوبی داشته است. [۴]

در این پروژه به بررسی و ساخت دبی‌سنج حرارتی لوله مویی برای مصارف خانگی پرداخته شده است. به‌طور رایج در مصارف خانگی از دبی‌سنج حجمی دیافراگمی استفاده می‌شود و مصرف گاز خانگی در بازه صفر تا ۶ مترمکعب بر ساعت می‌باشد. دبی‌سنج‌های دیافراگمی به محاسبه حجم عبوری به شکل

---

<sup>۱</sup> Tomas

<sup>۲</sup> Komia

<sup>۳</sup> Sensor tube

<sup>۴</sup> Kim

<sup>۵</sup> Jang

<sup>۶</sup> Farzaneh Gord

سیکلی، دبی کل حجم عبوری را نشان می‌دهند. از مزایای آن‌ها به قیمت ارزان و عمر طولانی اشاره کرد و معایب آن نیز داشتن قطعات متحرک که نیاز به تعمیرات دوره‌ای دارند و نیاز به تمیزکاری می‌باشد. ولی عیب اصلی آن‌ها نداشتن دقت کافی در دبی‌های بسیار پایین می‌باشد و نیز این کنتورها در دماهای مختلف خطای محاسبه‌ی حجم به‌خاطر تغییرات چگالی سیال دارند. از طرف دیگر می‌توان به مزایای دبی‌سنج حرارتی لوله مویی اشاره کرد از جمله: نداشتن جز متحرک که نیاز به تعمیرات داشته باشد و دقت بسیار بالای اندازه‌گیری در دبی‌ها پایین. [۴]

همان‌طور که می‌دانید مصرف خانگی بسیار پایین است و عدم دقت کافی این دبی‌سنج‌ها باعث شده ایران در سال مقدار زیادی گاز گم‌شده در شبکه‌های توزیع گاز خانگی داشته باشد. برای مثال حدود ۱۰ بلیون مترمکعب (۵ درصد کل مصرف گاز خانگی در کشور) در سال ۲۰۱۳ گاز گم‌شده داشته است. [۱۲]

از سوی دیگر کوبوکا<sup>۱</sup> و همکاران سال ۲۰۱۴ نشان دادند اغلب از دبی‌سنج حرارتی برای اندازه‌گیری گاز استفاده می‌شود که انتقال حرارت در آن تابعی از خواص حرارتی است که می‌تواند با تغییر فشار و دمای سیال تغییر نماید، بنابراین سیال گازی موردنظر باید در زمان کار دارای خواص حرارتی ثابت باشد. در ضمن به خاطر مشکل جذب حرارت در مایعات این دبی‌سنج‌ها معمولاً برای گازها استفاده می‌شوند. [۱۳]

فیسو<sup>۲</sup> و همکاران در سال ۲۰۱۴ به مطالعه بر تغییرات ترکیبات گاز و میزان خطای محاسبه در ۴ دبی متفاوت برای چند ترکیب گاز در دبی‌سنج حرارتی پرداختند تا میزان حساسیت دبی‌سنج حرارتی نسبت به تغییرات ترکیب گاز مشخص شود. [۱۴] کسکتا<sup>۳</sup> و همکاران در سال ۲۰۱۶ نیز روش‌های

---

<sup>۱</sup> Cubukcu

<sup>۲</sup> Ficco

<sup>۳</sup> Cascetta

کالیبراسیون و تحلیل عدم قطعیت را برای دبی‌سنج حرارتی لوله مویی بررسی نمودند. در این کار به‌طور خاص برای گاز طبیعی در کاربرد خانگی (G4) مورد ارزیابی قرار گرفت. [۹]

در این پروژه به‌جای دبی‌سنج‌های دیافراگمی از دبی‌سنج‌های حرارتی لوله مویی برای مصارف خانگی استفاده شده است. برونچ و همکاران در سال ۲۰۰۹ به بررسی دوبعدی این دبی‌سنج با نرم‌افزار فلونت<sup>۱</sup> با گاز متان پرداختند. برای ساده‌سازی از گاز متان استفاده کردند که ۹۰ درصد گاز طبیعی را تشکیل می‌دهد. [۱۵]

## ۲-۲- دبی‌سنج حرارتی لوله مویی

دو نوع دبی‌سنج حرارتی داریم که نوع اول غوطه‌ور و دیگری از نوع لوله‌مویی است. دبی‌سنج حرارتی غوطه‌ور در فصل اول به‌طور اجمالی توصیف شده است.

درزمینه‌ی دبی‌سنج حرارتی مطالعات کمی انجام شده به‌خصوص برای نوع لوله مویی مراجع و استانداردها بسیار کمی به آن پرداختند. هینکل<sup>۲</sup> و ماریانو<sup>۳</sup> در سال ۱۹۹۱ به شبیه‌سازی دوبعدی انتقال حرارت در لوله‌ی حسگر پرداختند. فرضیاتی که آن‌ها داشتند این بود که جریان سیال در لوله‌ی حسگر از نظر حرارتی و هم از نظر هیدرودینامیکی کاملاً توسعه‌یافته است و عدد ناسلت بین دیواره لوله و جریان گاز در لوله‌ی حسگر برابر ۴,۳۶ بوده است. [۱۶] در سال ۲۰۰۵ کیم و همکاران مطالعاتی بر خواص گذرا بر لوله حسگر در یک دبی‌سنج جرمی حرارتی به‌طور تحلیلی و آزمایشگاهی پرداختند. [۱۷]

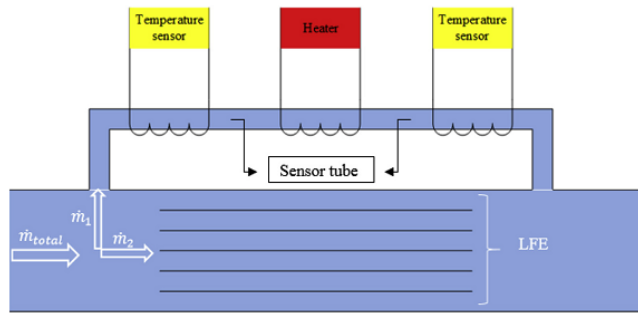
---

<sup>۱</sup> Fluent

<sup>۲</sup> Hinkle

<sup>۳</sup> Mariano





شکل ۱-۲: طرح شماتیک دبی سنج جرمی حرارتی لوله موئی [۴]

شکل ۱-۲ نمایی شماتیک از دبی سنج حرارتی لوله موئی است. همان طور که مشاهده می شود جریان اصلی سیال به دو بخش تقسیم می شود، بخش اعظم جریان ( $\dot{m}_2$ ) از قسمتی به نام آرام ساز عبور کرده و قسمت اندکی از جریان ( $\dot{m}_1$ ) از لوله ی حسگر عبور می کند. در صورتی که جریان در دو مسیر آرام باشد نسبت نرخ جریان جرمی در دو مسیر مقدار ثابتی است.

مطابق توضیحات بالا کل نرخ جریان جرم عبوری از دبی سنج به صورت زیر است:

$$\dot{m}_t = \dot{m}_1 + \dot{m}_2 = \dot{m}_1 \left( 1 + \frac{\dot{m}_2}{\dot{m}_1} \right) = k \dot{m}_1 \quad (۱-۲)$$

برای به دست آوردن  $k$  باید از روابط زیر استفاده شود که برای جریان کاملاً توسعه یافته است:

$$\Delta p_s = \frac{128 \cdot \mu \cdot l}{\rho \cdot \pi \cdot D_{in}^4} \dot{m}_1 \quad (۲-۲)$$

که  $\mu$ ,  $\rho$ ,  $D_{in}$ ,  $\Delta p_s$  به ترتیب افت فشار در لوله ی حسگر، قطر داخلی لوله ی حسگر، چگالی سیال و لزجت دینامیکی سیال می باشند. و نیز افت فشار در قسمت آرام ساز به شکل زیر می باشد.

$$\Delta p_{LFE} = \frac{128 \cdot \mu \cdot l}{\rho \cdot N \cdot \pi \cdot D_{in}^4} \dot{m}_2 \quad (۳-۲)$$

که  $\Delta p_{LFE}$  افت فشار در قسمت آرام ساز می باشد. از سویی در دو سمت آرام بوده و افت فشار در دو بخش با هم برابر است.

$$\Delta p_{LFE} = \Delta p_s \rightarrow \frac{\dot{m}_2}{\dot{m}_1} = N \rightarrow \dot{m}_t = (N + 1) \dot{m}_1 \rightarrow k = N + 1 \quad (۴-۲)$$

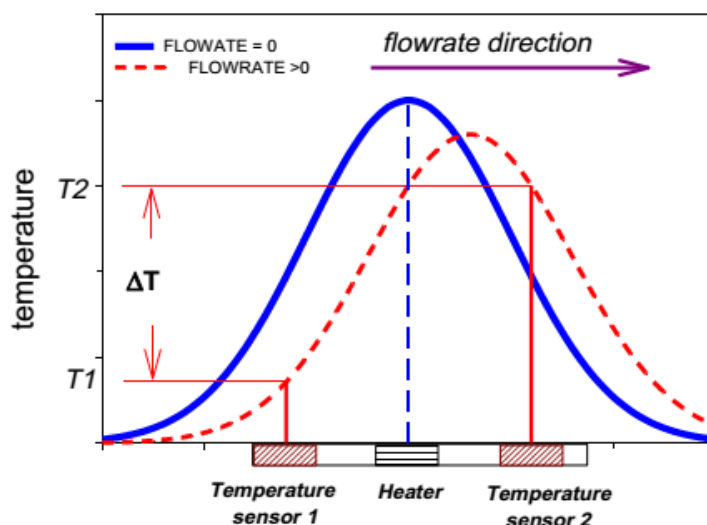
البته لازم به ذکر است لزوماً نیاز نیست که قطر لوله‌های لوله‌ی حسگر و قسمت آرام‌ساز با هم برابر باشد بلکه با دانستن نسبت مساحت آن‌ها و برابری افت دو قسمت می‌توان نسبت دبی‌ها را به دست آورد. رابطه افت فشار برای جریان آرام در لوله به شکل زیر است.

$$h_f = \frac{32 \cdot \mu \cdot l \cdot v}{\rho \cdot g \cdot d^2} \quad (5-2)$$

که  $h_f$ ,  $d$ ,  $l$ ,  $v$  به ترتیب افت هیدرولیکی، قطر لوله، طول لوله و سرعت سیال هستند. و با برابر قرار دادن افت فشار در دو سمت رابطه ۶-۲ حاصل می‌شود.

$$v_s = v_{LFE} \left( \frac{d_s}{d_{LFE}} \right)^2 \quad (6-2)$$

با داشته رابطه بین سرعت و سطح مقطع دو مسیر می‌توان نسبت بین دو دبی را نیز به دست آورد. نحوه کار در لوله‌ی حسگر به این شکل است که با انتقال حرارت توسط المنت حرارتی به لوله زمانی که سیال حرکت نکند به صورت متقارن حرارت به بالادست و پایین دست منتقل می‌شود. و همان‌طور که در شکل ۲-۲ مشاهده می‌شود اختلاف دما در دو حسگر برابر صفر است. زمانی که جریان به حرکت بیافتد دما در بالادست کاهش می‌یابد و حرارت بیشتری به پایین دست منتقل می‌شود و دما در پایین دست افزایش می‌یابد و اختلاف دما در دو حسگر افزایش می‌یابد. پس هر زمان دبی عبوری صفر باشد اختلاف دما صفر است و با افزایش دبی عبوری اختلاف دمای بالاتری حاصل می‌شود. [۴]



شکل ۲-۲: نمودار کیفی تغییرات اختلاف دما در لوله‌ی حسگر در دبی‌سنج [۹]

حال این اهمیت دارد که تا چه میزان دبی عبوری سیال و اختلاف دما با هم رابطه خطی دارند و رابطه ۷-۲ برقرار است.

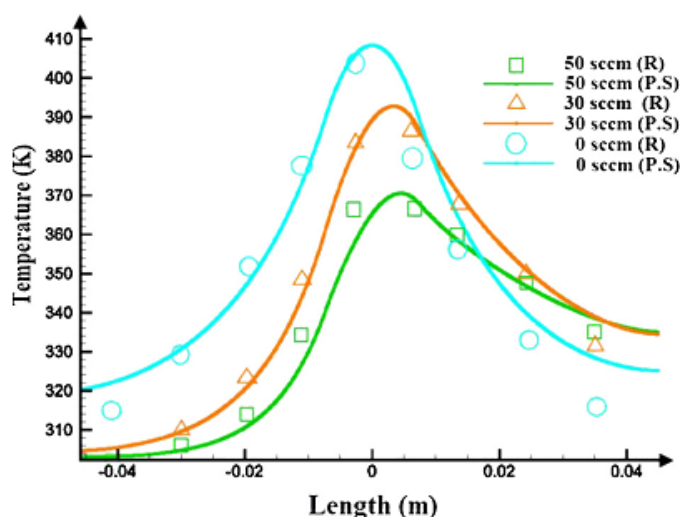
$$\dot{m}_1 = c \cdot \Delta T \quad (7-2)$$

که  $c$  ثابت کالیبراسیون می‌باشد. پارامتر مهم دیگری که در دبی‌سنج حرارتی لوله مویی مهم است، میزان حساسیت آن می‌باشد که به صورت رابطه زیر می‌باشد:

$$S = \frac{\partial(T_s|_{x=L_s} - T_s|_{x=-L_s})}{\partial \dot{m}} \quad (8-2)$$

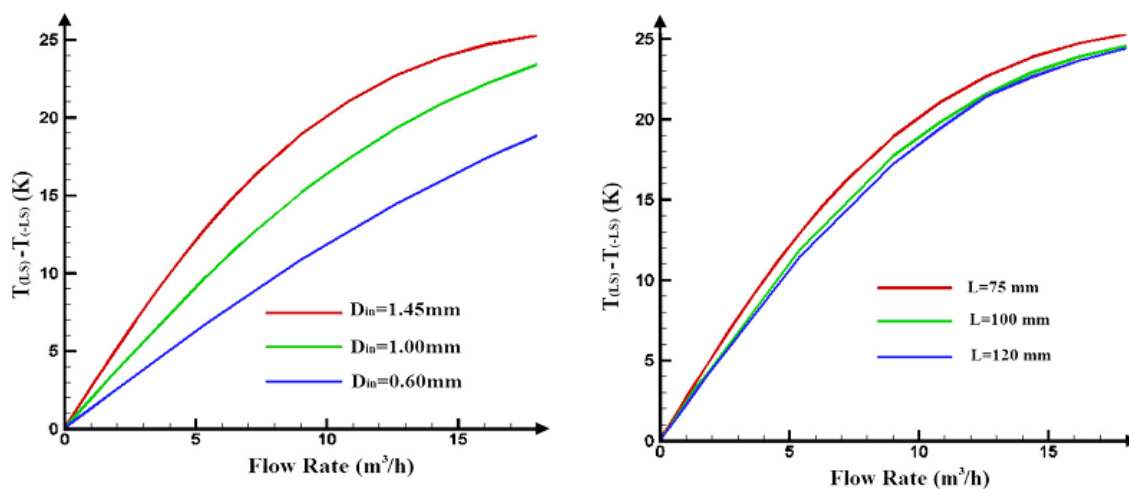
که  $L_s$  و  $-L_s$  محل قرارگیری حسگرها در بالادست و پایین دست جریان است که به حالت متقارن از وسط گرمکن می‌باشد. حساسیت دبی‌سنج در واقع نسبت نرخ تغییرات دما در دو حسگر به نرخ تغییرات دبی عبوری است.

در سال ۲۰۱۵ فرزانه‌گرد و همکاران در راستای مطالعات روی دبی‌سنج حرارتی لوله مویی برای طراحی این دبی‌سنج نتایجی از شبیه‌سازی خود ارائه کردند سپس آن را با نتایج آزمایشگاهی کیم و همکاران مقایسه نمودند که مطابقت قابل قبولی داشته است. در زیر نمونه‌ای از نتایج آن‌ها نشان داده می‌شود. [۴]



شکل ۲-۳: نمودار مقایسه نتایج شبیه‌سازی با نتایج آزمایشگاهی [۴]

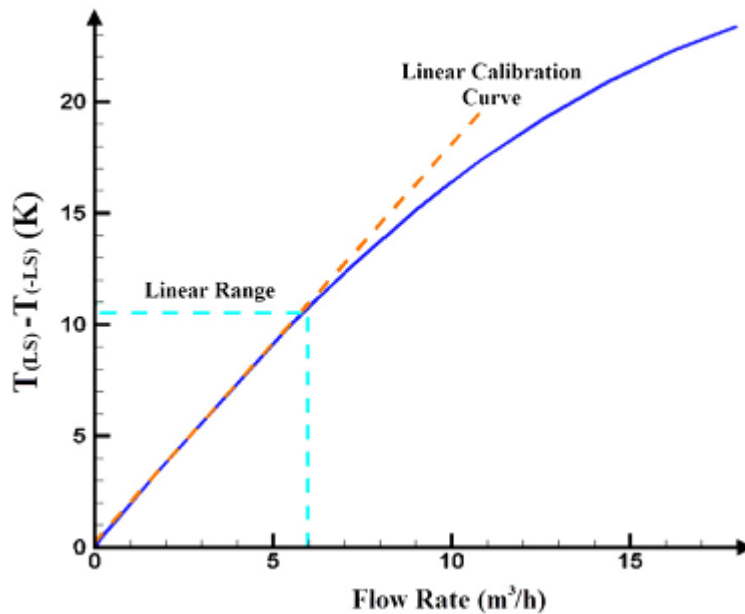
همچنین در طراحی این دبی‌سنج در طول‌ها و قطرهای مختلف شبیه‌سازی کردند و بهینه‌ترین حالت را به دست آوردند. در شکل ۲-۴ نمونه‌ای از این شبیه‌سازی آورده شده است.



شکل ۲-۴: نمودار مقایسه تأثیر قطر داخلی و طولی (به ترتیب سمت چپ و راست) بر خطی بودن نسبت بین دبی و اختلاف دما [۴]

همان‌طور که در شکل ۲-۴ مشاهده می‌شود نسبت تغییرات دما به تغییرات دبی تا قسمتی از منحنی ثابت است، سپس رابطه غیرخطی می‌شود. آن‌ها برای حداکثر دبی ۶ مترمکعب بر ساعت که حداکثر دبی یک کنتور G4 باشد بهینه‌ترین حالت را به دست آوردند که قطر داخلی ۱,۴۵ میلی‌متر و طول ۷۵

میلی متر می باشد. دبی سنج با این مشخصات تا دبی ۶ مترمکعب بر ساعت نسبت تغییرات دبی به تغییرات اختلاف دما ثابت است. که بازه خطی بودن را می توان در شکل ۲-۵ مشاهده نمود.



شکل ۲-۵: نمودار خطی بودن با قطر داخلی ۱,۴۵ میلی متر و طول ۷۵ میلی متر [۴]

با توجه به این نتایج دبی جرمی با رابطه ۲-۹ به دست آمده است.

$$\dot{m} = 0.3834 \times \Delta T \quad (۲-۹)$$

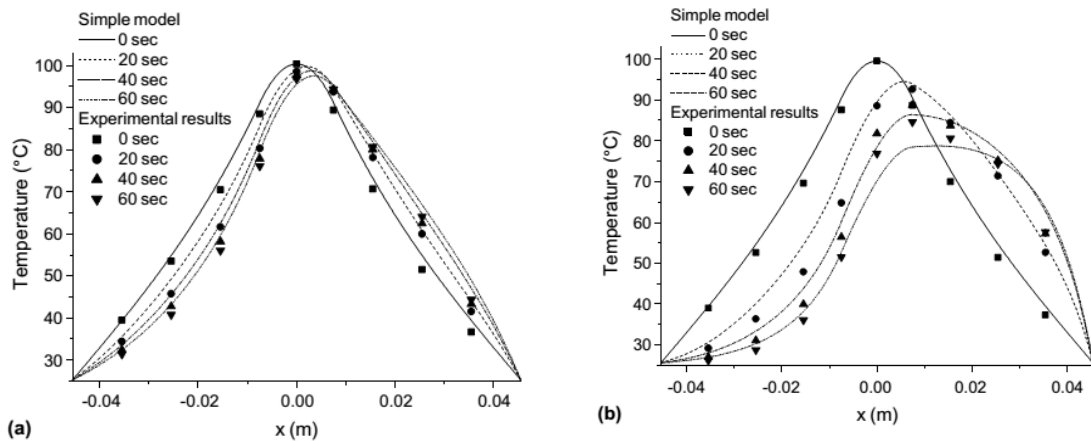
در نهایت کار میزان عدم قطعیت برای نیتروژن ۱,۵۶ درصد و برای گاز طبیعی ترکمنستان ۱,۸۳ درصد به دست آوردند. پس دبی سنج حرارتی لوله مویی دارای دقت بالا و مزایای خوبی است که این پتانسیل را دارد که جایگزین مناسبی برای دبی سنج های دیافراگمی باشد. [۴]

در سال ۲۰۰۵ نیز کیم و همکاران به بررسی آزمایشگاهی جریان در لوله های مویی پرداختند. آن ها در مطالعه شان از دو لوله با قطر خارجی ۰,۸۱۲ میلی متر و ۱,۲۵۷ میلی متر با ضخامت به ترتیب ۰,۲۵ و ۰,۲۸ میلی متر استفاده نمودند. در مسیر لوله ترموکوپل های متعدد در فواصل متقارن از المنت حرارتی وسط قرار دادند. از این لوله دو جریان ۱۰ و ۳۰ سانتی مترمکعب بر دقیقه استاندارد عبور

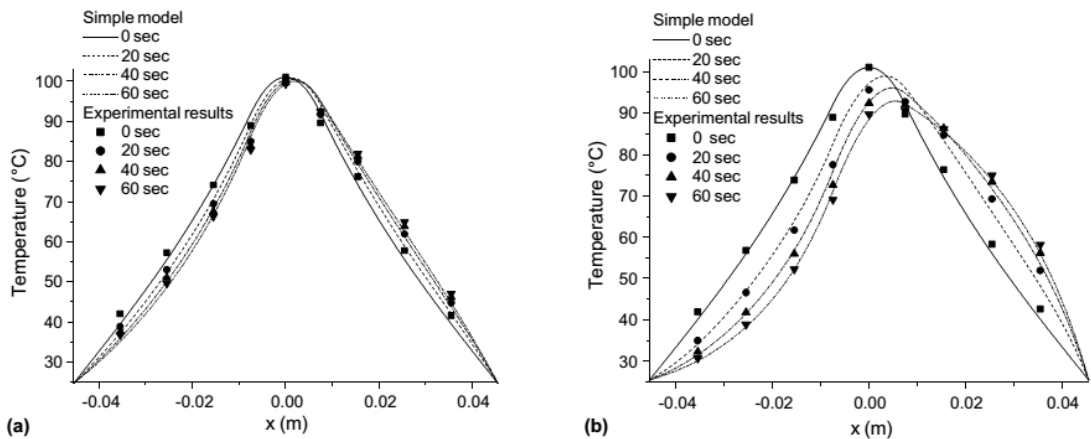
<sup>۱</sup> Thermocouple

دادند. جنس استفاده شده در این پژوهش استیل زنگ نزن ۳۰۴ به طول ۹۱ میلی‌متر بوده است. که

نتایج حاصل از آزمایش در شکل ۲-۶ و ۲-۷ آمده است. [۱۷]



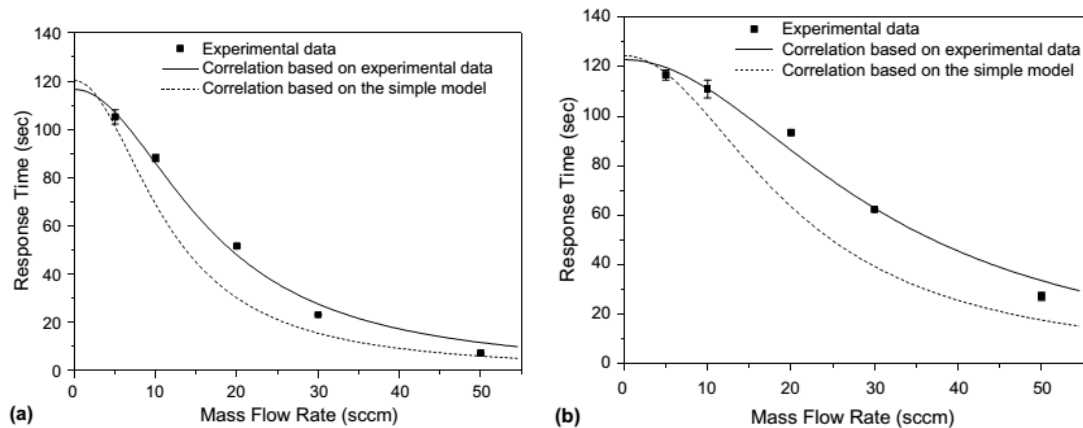
شکل ۲-۶: نمودار مقایسه نتایج آزمایشگاهی و مدل عددی برای دبی ۱۰ و ۳۰ سانتی‌مترمکعب بر دقیقه استاندارد برای لوله با قطر خارجی ۰٫۸، [۱۷].



شکل ۲-۷: نمودار مقایسه نتایج آزمایشگاهی با مدل عددی برای دبی ۱۰ و ۳۰ سانتی‌مترمکعب بر دقیقه استاندارد برای لوله با قطر خارجی ۱٫۲، [۱۷].

همان‌طور مشاهده می‌شود برای دو لوله با قطر خارجی ۰٫۸ و ۱٫۲ میلی‌متر در دو جریان ۱۰ و ۳۰ سانتی‌مترمکعب بر دقیقه استاندارد نمودار ارائه شده که در آن نتایج عددی و آزمایشگاهی مطابقت خوبی دارند. بحث دیگری که در این مقاله بررسی شده است زمان پاسخگویی بوده که مسئله مهمی در محاسبه جریان می‌باشد. نتایج کیم و همکاران برای زمان پاسخگویی<sup>۱</sup> به‌صورت زیر است.

<sup>۱</sup> Response time



شکل ۲-۸: نمودار مقایسه نتایج عددی و آزمایشگاهی زمان پاسخگویی برای لوله با قطر خارجی ۰,۸ و ۱,۲ به ترتیب از چپ به راست. [۱۷]

همان طور مشاهده می شود با افزایش دبی زمان پاسخگویی کاهش می یابد و از طرف دیگر با افزایش قطر خارجی لوله زمان پاسخگویی افزایش می یابد.

### ۳-۲-۳- حسگر دما

برای محاسبه دما هیچ روشی وجود ندارد که بتوان آن را به طور مستقیم به دست آورد بلکه از روی اثری که حرارت بر محیط می گذارد به محاسبه دما می پردازند. این اثر می تواند انبساط، انقباض یک جسم و یا تغییر مقاومت یک عنصر باشد. اندازه گیری دما به سه دسته زیر تقسیم می شود:

۱- روش مکانیکی

۲- روش تشعشعی

۳- روش الکتریکی

### ۳-۲-۱- روش مکانیکی

در این روش از دماسنج های حاوی مایعات، فشار بخار، گازی و بی متال<sup>۱</sup> استفاده می شود.

<sup>۱</sup> Bimetal

در دماسنج‌های حاوی مایعات از تغییرات حجم و شکل مواد به اندازه‌گیری دما می‌پردازند. از جمله سیالاتی که در این زمینه استفاده می‌شود، الکل، انواع هیدروکربن‌ها و فلز جیوه می‌باشند. دماسنج‌های حاوی گاز مشابه دماسنج‌های حاوی مایعات کار می‌کنند ولی به‌جای مایع از گاز برای اندازه‌گیری استفاده می‌نمایند. از جمله گازهایی که برای این دماسنج‌ها استفاده می‌شود، ازت و هلیوم می‌باشند. دماسنج‌های فشار بخار مبنای کاری آن‌ها اندازه‌گیری فشار ناشی از تبخیر مایع است، زیرا فشار بخار مایع تابعی از دمای آن است. سیالات مورد استفاده در این دماسنج، الکل، اتر، دی‌اکسید سولفور و تولوئن می‌باشند. دماسنج‌های بی‌متال بر اساس اختلاف انبساط دو فلز به هم چسبیده کار می‌کنند که مبنای اندازه‌گیری آن حرکت این فلز می‌باشد. برنج و فولاد نیکل دار از جمله فلزات مورد استفاده در این دماسنج می‌باشد. [۱۸]

### ۲-۳-۲- روش تشعشی

در این روش از پیزومترهای نوری و تشعشی برای اندازه‌گیری دما استفاده می‌شود. در پیزومترهای نوری مبنای کار مقایسه رنگ بین جسم گداخته شده و فیلامان پیزومتر می‌باشد و تا ۲۰۰۰ درجه فارنهایت قابلیت استفاده دارد. در پیزومترهای تشعشی اساس اندازه‌گیری انرژی ساطع شده از جسم گرم می‌باشد که توسط یک لنز یا مجموعه آینه بر روی عنصر حسگر حرارت متمرکز می‌شود، سپس دمای حسگر اندازه‌گیری می‌شود. [۱۸]

### ۲-۳-۳- روش الکتریکی

حرارت‌سنج مقاومتی RTD، حرارت‌سنج ترمیستور<sup>۱</sup> و ترموکوپل‌ها به این روش کار می‌کنند.

---

<sup>۱</sup> Thermistor

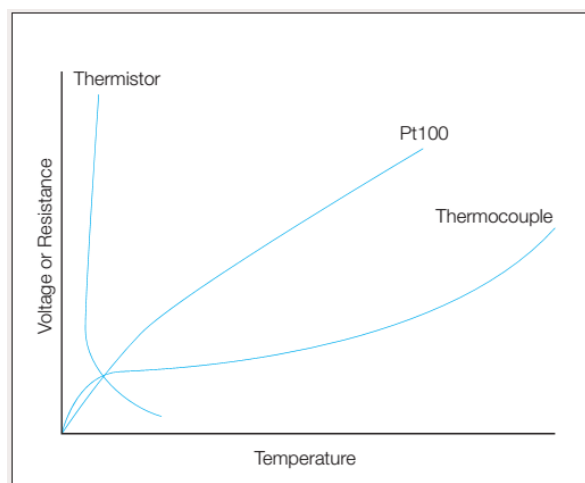


حرارت‌سنج مقاومتی: این حسگرها ممکن است به شکل فلزی یا نیمه‌هادی باشند البته نوع فلزی آن مرسوم است. این حسگر به شکل یک مقاومت سیمی از جنس نیکل، پلاتین و یا مس ساخته می‌شود. این حسگرها برای دماهای پایین مناسب است. [۱۹]

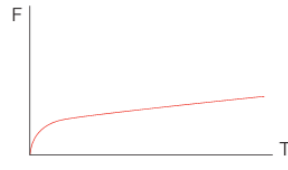
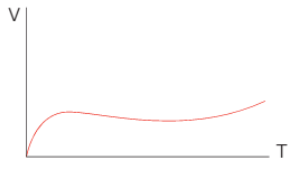
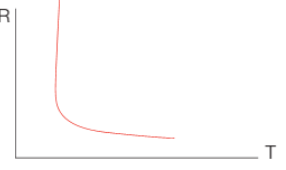
حرارت‌سنج ترمیستوری: این حسگرها از جنس نیمه‌هادی می‌باشند که به شکل مهره، دایره و میله ساخته می‌شوند. ترمیستورها به دو دسته تقسیم می‌شوند: مقاومت با ضریب حرارتی منفی NTC و مقاومت با ضریب حرارتی مثبت PTC. حسگر NTC با افزایش دما، مقاومتش کاهش می‌یابد. دقت NTC ها از RTD ها کمتر است و غیرخطی نیز می‌باشند. PTC ها با افزایش دما، مقاومتشان افزایش می‌یابد. از این حسگر برای حفاظت وسایل الکتریکی در برابر افزایش دما استفاده می‌شود. [۱۹]

ترموکوپل: اساس کار ترموکوپل‌ها پدیده سبیک است که وقتی دو فلز متفاوت تشکیل یک مدار بسته دهد و محل اتصالشان در دو دمای متفاوت قرار گیرد ایجاد جریان الکتریکی در مدار می‌شود. ترموکوپل از رایج‌ترین دماسنج‌ها در صنعت می‌باشند که بازه کاری آن‌ها از صفر تا حدود ۱۷۰۰ درجه سانتی‌گراد می‌باشد. [۱۹]

نمودار تغییر ولتاژ نسبت به تغییر دما برای سه مدل حسگر RTD، ترموکوپل و ترمیستور و جدول مقایسه آن‌ها به شکل زیر است:



شکل ۲-۹: تغییر ولتاژ حسگرهای الکتریکی نسبت به دما [۱۹]

	RTD	Thermocouple	Thermistor
			
Temperature range	-260 to 850°C	-270 to 1800°C	-80 to 150°C (typical)
Sensor Cost	Moderate	Low	Low
System Cost	Moderate	High	Moderate
Stability	Best	Low	Moderate
Sensitivity	Moderate	Low	Best
Linearity	Best	Moderate	Poor
Specify for:	General purpose sensing Highest accuracy Temperature averaging	Highest temperatures	Best sensitivity Narrow ranges (e.g. medical) Point sensing
Advantages	Most Stable Most accurate More Linear than thermocouples	Self Powered Rugged Inexpensive Wide temperature range	High output Fast response
Disadvantages	Expensive Current source required Small $\Delta R$ Low absolute resistance	Non linear Low voltage Reference junction required Least stable & Least sensitive	Non linear Limited temperature range Current source required Self heating & Fragile

شکل ۲-۱۰: مقایسه بین حسگرهای RTD، ترموکوپل و ترمیستور [۱۹]

## ۲-۴- مدارهای الکترونیکی

مدارهای موجود شامل میکروکنترلرهای AVR، ARM، DSP و FPGA می‌شود که هرکدام را به اختصار توضیح داده می‌شود.

میکروکنترلر AVR: در میکروکنترلرهای AVR از معماری RISC (reduced instruction set architecture) استفاده می‌شود. این به این معنی می‌باشد که در هر کلاک می‌توانند یک دستور ساده، مانند جابجایی عدد از حافظه به رجیستر را انجام دهند. این میکروکنترلرها معمولاً ۸ بیتی هستند و برای کارهای کنترلی مناسب می‌باشند. در واقع در پروژه‌هایی که نیاز به عملیات پردازشی نیست این

میکروکنترلرها بهترین انتخاب هستند. از کاربردهای AVR به این موارد می‌توان اشاره کرد: استفاده در سیستم‌های امنیتی، کنترل روشنایی، استفاده در پرینترها، کنترل موتور.

میکروکنترلر ARM: این میکروکنترلر با میکروپروسسور ۳۲ بیتی و با معماری RISC کار می‌کند. این میکروها کاربردهای مختلف و زیادی دارند به‌خصوص در سیستم‌های کاربرپسند که باید ظاهر زیبایی داشته باشند به کار می‌روند. این به این علت است که ARM برای اجرای سیستم‌عامل‌های لینوکس و ویندوز CE مناسب‌اند. کاربر با نوشتن برنامه خود در ویژوال استودیو به صورت گرافیکی می‌تواند فایل exe ایجاد کند و روی سیستم‌عامل پردازنده نصب نماید. از کاربردهای ARM می‌توان به این موارد اشاره نمود: پایانه‌های بانکی POS، تلفن‌های همراه (مانند N8)، موقعیت‌یاب (GPS)، دوربین‌های عکاسی و فیلم‌برداری، تبلت و ... .

DSP: واژه DSP مخفف Digital Signal Processor می‌باشد. در واقع پردازشگر سیگنال‌های دیجیتال شامل نمایش دیجیتالی سیگنال‌ها می‌باشد و استفاده از سیستم‌های دیجیتالی برای تحلیل کردن، تغییر دادن، ذخیره‌سازی یا استخراج اطلاعات از سیگنال‌های دیجیتالی می‌باشد. این مدار برای پردازش داده با سرعت بالا طراحی شده و در صدا، تصویر، مخابرات و غیره استفاده می‌شود. از مواردی که این سیستم استفاده می‌شود می‌توان به این موارد اشاره نمود: اسباب‌بازی، تلفن تصویری، مودم، سیستم‌های صوتی، سیستم‌های سه‌بعدی گرافیکی، سیستم پردازش تصویر و ... .

FPGA: FPGA با استفاده از معماری موازی خوبی که دارند، توانایی محاسباتی چشم‌گیری برای کارایی خیلی بالا فراهم می‌کنند. سخت‌افزار FPGA این قابلیت را دارد که دوباره پیکربندی شود، بنابراین برای زمانی که نیازمند عملکرد بالا و قیمت تولید پایین هستیم، طراحان این اجازه را دارند که الگوریتم‌های خود را بهینه‌سازی کنند. این سیستم دارای معماری خیلی منعطفی است، البته در قبال این انعطاف‌پذیری باید هزینه بیشتری صرف کرد. در زمان‌هایی که نیاز داریم یک الگوریتم پردازشی را روی تعداد زیادی داده هم‌زمان اعمال کنیم، FPGA بهترین انتخاب می‌باشد. سرورها،

ذخیره‌سازی، محاسبه با عملکرد بالا، رادارها، جنگ‌افزار الکترونیکی، معالجه پزشکی الکتریکی، شبکه‌ها و انتقالات و کاربردهای زیاد دیگر از جمله کاربرد های این سیستم می‌باشد.

## ۲-۵- کالیبراسیون<sup>۱</sup> و عدم قطعیت<sup>۲</sup>

هر دستگاه ویژگی‌های فنی و ویژگی‌های اندازه‌گیری خود را دارد. دستیابی به کیفیت برتر از طریق انجام آزمون‌ها و اندازه‌گیری‌های مطمئن ارزیابی می‌گردد، این بحث مطرح می‌شود که اندازه‌گیری مطمئن چگونه و از چه روش اندازه‌گیری میسر می‌شود؟

پاسخ این است که فقط کالیبراسیون درست و دوره‌ای می‌تواند کیفیت یک دستگاه را نشان دهد. با انجام کالیبراسیون به دنبال یافتن ویژگی‌های اندازه‌گیری دستگاه هستیم تا در صورت نیاز اصلاحات لازم را انجام دهیم. اغلب استانداردهای مدیریت کیفیت در بخش الزامات فنی، از کالیبراسیون تجهیزات نام برده و آن را لازم و ضروری می‌دانند.

کالیبراسیون روش‌های مختلفی دارد که در آن به محاسبه ضریب کالیبراسیون پرداخته می‌شود و در سیگنال‌های خروجی اصلاحات موردنیاز را انجام داده و سپس عدم قطعیت دستگاه مورد محاسبه قرار می‌گیرد.

## ۲-۶- مفهوم عدم قطعیت در اندازه‌گیری

همان‌گونه که هیچ دستگاه اندازه‌گیری<sup>۳</sup> نتیجه‌ای که توسط نمایش‌های نشانگر خود به کاربر اعلام می‌کند قطعی نیست، نتیجه هیچ آزمونی نمی‌تواند به صورت یک عدد خالص و بدون ابهام گزارش شود. این میزان کمی از ابهام<sup>۴</sup> با عنوان عدم قطعیت اندازه‌گیری خوانده می‌شود. عدم قطعیت نباید با

---

<sup>۱</sup> Calibration

<sup>۲</sup> Uncertainty

<sup>۳</sup> Measuring instrument

<sup>۴</sup> Doubt

خطای اندازه‌گیری (نظام‌مند یا تصادفی) اشتباه گرفته شود. اگرچه خطا خود می‌تواند عاملی برای ایجاد عدم قطعیت باشد. [۲۰]

میزان شک و ابهامی که در نتیجه اندازه‌گیری وجود دارد ناشی از عوامل مختلفی است. شناسایی این عوامل مهم‌ترین گام در تعیین و کمی کردن عدم قطعیت آزمون است. با توجه به اینکه نتیجه هر آزمون در هر آزمایشگاه با میزانی از ابهام یا همان عدم قطعیت همراه است، در موارد مقتضی این پارامتر باید ارزیابی و گزارش شود.

عدم قطعیت نتیجه اندازه‌گیری (آزمون) ناشی از ابهامی است که هرکدام از عوامل شرکت‌کننده در فرآیند اندازه‌گیری با خود وارد فرآیند می‌کنند. بسته به میزان ساده یا پیچیده بودن فرآیند اندازه‌گیری، تعیین و کمی کردن ابهام عوامل نیز می‌تواند ساده یا مشکل باشد.

فرآیند اندازه‌گیری می‌تواند بسیار ساده و با استفاده از تعداد کم دستگاه و ابزار اندازه‌گیری باشد یا این فرآیند پیچیده و با استفاده از پارامترهای زیادی برای اندازه‌گیری انجام شود. هر چه پارامترهای مؤثر در اندازه‌گیری کمتر باشد محاسبه عدم قطعیت راحت‌تر است.

در محاسبه عدم قطعیت دبی‌سنج باید در ابتدا پارامترهای مؤثر در محاسبه دبی را به دست آورد و همچنین باید دید که هرکدام از پارامترهای مؤثر از چه عواملی تأثیر می‌پذیرند. اگر  $u(y)$  متغیر خروجی باشد (مثل مقدار دبی در دبی‌سنج) عدم قطعیت آن با رابطه ۲-۱۰ به دست می‌آید. [۲۰]

$$u(y) = \sqrt{\sum_{k=1}^k u_k^2(y)} \quad (10-2)$$

$$u_k(y) = c_k u(x_k) \quad (11-2)$$

که  $C_k$  ضریب متغیر یا حساسیت متغیر ورودی  $x_k$  در اندازه‌گیری می‌باشد و  $u(x_k)$  عدم قطعیت استاندارد متغیر ورودی می‌باشد. از طرفی عدم قطعیت استاندارد ورودی‌ها طبق استانداردها وجود دارد، بنابراین با داشتن این داده‌ها می‌توان میزان عدم قطعیت متغیر خروجی را محاسبه کرد.

## ۲-۶-۱-عدم قطعیت مبسوط<sup>۱</sup>

عدم قطعیت مبسوط از ضرب عدم قطعیت  $u(y)$  در فاکتور پوششی ( $k$ ) به دست آمده و به همراه یک سطح اطمینان خاص<sup>۲</sup> به عنوان عدم قطعیت اندازه‌گیری با علامت  $U$  گزارش می‌شود. در آزمون‌هایی که تعداد عوامل شرکت‌کننده در تعیین عدم قطعیت به اندازه‌ای باشند که بتوان منحنی توزیع احتمال<sup>۳</sup> نتیجه آزمون را نرمال<sup>۴</sup> فرض کرد، فاکتور پوششی  $k=2$  سطح اطمینانی معادل ۹۵,۴۵٪ می‌دهد که معادل تقریباً ۹۵٪ اعلام می‌شود. [۲۰]

سطح اطمینان ۹۵٪ سطح اطمینان متعارف برای گزارش عدم قطعیت اکثر آزمایشگاه‌های آزمون و کالیبراسیون می‌باشد.

## ۲-۷-روش‌های کالیبراسیون دبی سنج گاز

انتخاب یک روش کالیبراسیون برای کالیبره کردن دبی‌سنج بستگی به نوع دبی‌سنج، بازه جریان و شرایط جریان، دما، فشار و دقت موردنیاز در کالیبراسیون می‌باشد. دبی‌سنج در حال کالیبره شدن دما، فشار و بنابراین حجم گاز اندازه‌گیری شده زیر تست با مقدار محاسبه‌شده در استاندارد تفاوت خواهد داشت که باید اصلاح شود. روش‌های کالیبراسیون مرجع با استاندارد به صورت زیر دسته‌بندی می‌شوند. [۲۱]

---

<sup>۱</sup> Expanded uncertainty

<sup>۲</sup> Coverage probability

<sup>۳</sup> Probability distribution

<sup>۴</sup> Normal distribution

۱- روش‌های جابجایی

۲- روش‌های حجمی و وزنی

۳- روش جابجایی گاز

۴- روش ناز صوتی

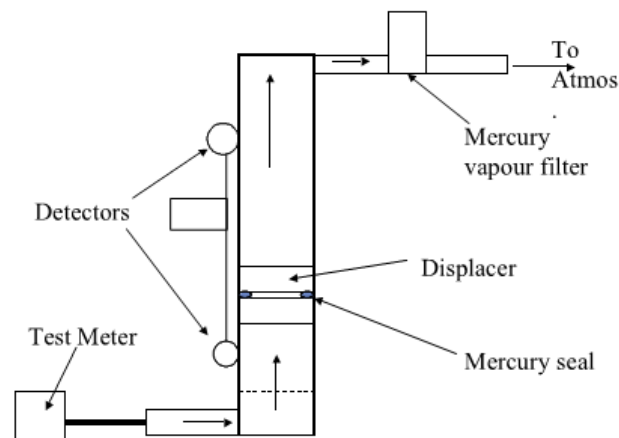
۵- روش دی‌سنج مرجع

۶- و ....

## ۲-۷-۱- روش جابجایی

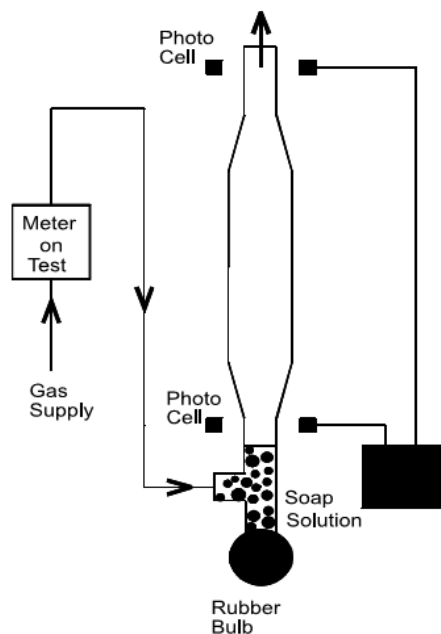
از تکنیک‌هایی که در این روش برای کالیبراسیون استفاده می‌شوند می‌توان به سه روش زیر اشاره کرد:

**Mercury seal prover**: این روش برای جریان‌های کم استفاده می‌شود. در این دستگاه از یک جابجا شونده بسیار سبک در لوله شیشه‌ای عمودی استفاده می‌شود. پیستون به سمت بالا حرکت می‌کند و یک آب‌بند حلقه‌ای جیوه‌ای در تورفتگی پیستون قرار می‌گیرد. استفاده از پیستون عمودی و آب‌بند جیوه‌ای اصطکاک را به حداقل می‌رساند.



شکل ۲-۱۱: طرح شماتیک دی‌سنج mercury seal prover [۲۱]

**Soap film burette:** این نیز شکل دیگری از پایپ پرور<sup>۱</sup> می باشد که در کالیبراسیون استفاده می شود. در این مورد لوله شیشه ای به شکل عمودی قرار دارد با یک مخزن صابون حل شده با آب که در زیر ورودی گاز قرار دارد. زمانی که گاز وارد بارت می شود یک لایه نازکی از صابون ایجاد می شود و با سرعت برابر با سرعت گاز به سمت بالا حرکت می کند. با اندازه گیری زمان حرکت این لایه از صابون بین دو نقطه نرخ جریان گاز می تواند محاسبه شود.



شکل ۲-۱۲: طرح شماتیک دی سی سنج Soap film burette [۲۱]

این روش معمولاً برای محاسبه دی سی گاز بین  $10^{-4}$  تا  $10^{-7}$  مترمکعب بر ثانیه نزدیک به شرایط محیط استفاده می شود.

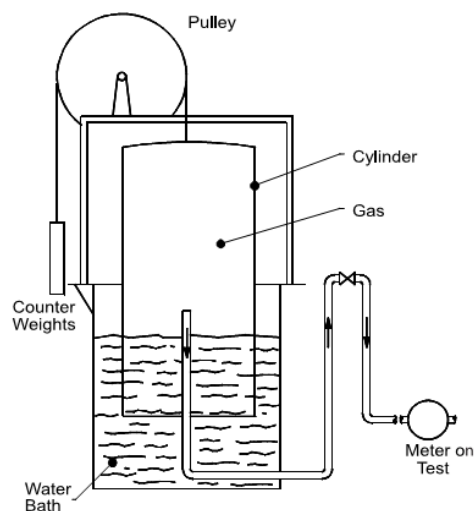
**بل پرور<sup>۲</sup>:** این روش استاندارد کالیبراسیون جریان گاز با دی سی پایین مثل دی سی سنج های خانگی می باشد. این دستگاه از یک استوانه که بالای آن بسته و پایینش باز است تشکیل شده است و درون حمام آب فرو رفته است. از طرف دیگر لوله ای که به دی سی سنج زیر تست متصل است درون حجم محبوس درون استوانه قرار دارد. با حرکت استوانه درون آب گاز درون این حجم محبوس از طریق لوله

<sup>۱</sup> Pipe prover

<sup>۲</sup> Bell prover



به سمت دبی سنج تحت تست جریان می‌یابد. با میزان جابجایی استوانه و داشتن رابطه بین حجم و طول می‌توان میزان دبی را محاسبه کرد.



شکل ۲-۱۳: طرح شماتیک دبی سنج بل پرور [۲۱]

در پژوهش فعلی از بل پرور به عنوان دبی سنج مرجع برای کالیبراسیون دبی سنج ساخته شده، استفاده شده است که مشخصات فنی آن در فصل بعدی به تفصیل آمده است.

## ۲-۷-۲- روش حجمی و وزنی

در روش حجمی باید حجم مجرا پایا و مشخص باشد و نیز در روش وزنی مجرا قبل و بعد پر شدن باید وزن آن را به دست آورد. با دانستن مشخصات سیال در دما و فشار پایا می‌توان دبی را به دست آورد.

## ۲-۷-۳- روش جابجایی گاز

در این روش گاز توسط مجرا که از حمام آب عبور کرده منتقل می‌شود. در این حالت آب درون حمام جابجا می‌شود به جای اینکه استوانه حرکت کند. وزن و دبی آب را به روش دیگر می‌توان محاسبه کرد که حجم آن به دست می‌آید. با اصلاحات دما و فشار مناسب حجم مایع با حجم گاز جابجا شده برابر است.

## ۲-۷-۴-روش نازل صوتی

نازل صوتی یک دبی سنج مرجع مؤثر است که می تواند برای کالیبراسیون تجهیزات استفاده شود. این روش به خاطر وسعت کاری زیادی که به عنوان استاندارد مرجع کالیبراسیون دارد می تواند در بسیاری از آزمایشگاه ها و کاربردها استفاده شود.

اگر افت فشار بین ورودی نازل و گلویی آن افزایش یابد، نرخ جریان افزایش می یابد تا سرعت صوت در گلویی ایجاد شود. در این حالت نازل به اصطلاح خفه شده و از این پس نرخ جریان عبوری از نازل برای هر فشاری در بالای جریان ثابت خواهد بود. در ضمن زمانی که سرعت سیال در نازل به سرعت صوت باشد، تغییرات فشار در پایین دست دیگر تأثیری بر بالادست ندارد و میزان دبی عبوری مستقل از تغییرات پایین دست می باشد. معادله نرخ جریان به صورت رابطه ۲-۱۲ می باشد.

$$\frac{dm}{dt} = C_d C^* A_t P \frac{1}{\sqrt{RT}} \quad (2-12)$$

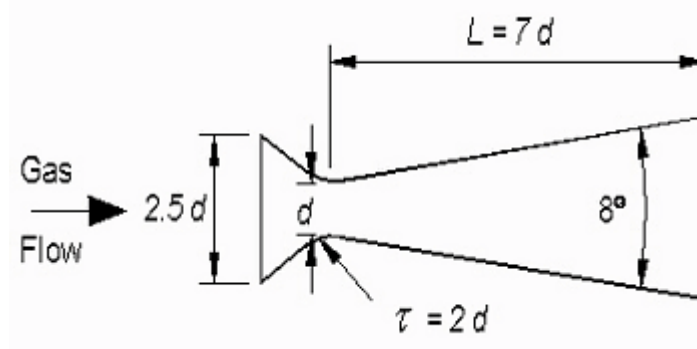
که در معادله:

$C_d$ : ضریب تخلیه

$C^*$ : فاکتور بحرانی جریان

$A_t$ : سطح مقطع گلویی نازل

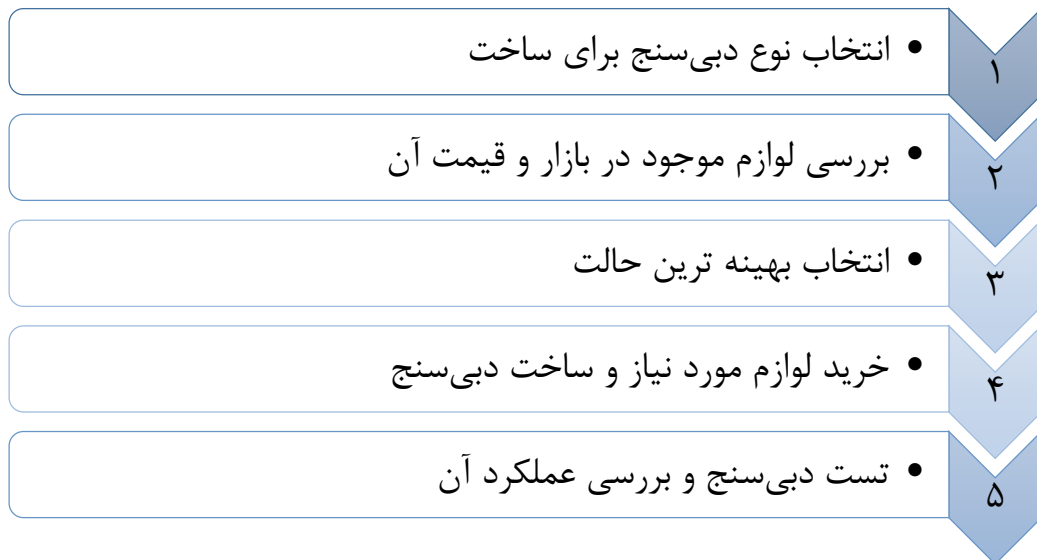
$T, P$ : مقدار فشار و دمای مطلق جریان بالادست



شکل ۲-۱۴: طرح شماتیک نازل صوتی [۲۱]

شکل ۲-۱۴، هندسه استاندارد نازل صوتی می‌باشد. در این حالت نرخ جریان عبوری وابسته به هندسه نازل، مشخصات گاز و دما و فشار در بالادست می‌باشد. پس اطلاعات دقیقی از شرایط ترمودینامیکی گاز باید داشته باشیم. شاید این مشکل باشد به‌طور مثال گاز طبیعی که دارای ترکیب پیچیده و متغیر است.

در این پروژه به طراحی و ساخت دبی‌سنج حرارتی لوله مویی پرداخته شد تا عملکرد آن را با نتایج عددی که قبلاً ارائه شده مقایسه شود. ابتدا دبی‌سنج موردنظر را انتخاب نموده و اجزای موردنیاز برای ساخت این دبی‌سنج مشخص می‌شود. سپس در بازار لوازم موردنظر را با توجه به پارامترهای طراحی انتخاب نموده و بعد از بررسی قیمت قطعات و انتخاب بهینه‌ترین حالت دبی‌سنج از جهات مختلف، قطعات را خریداری نموده و در نهایت ساخته خواهد شد. بعد از همه این موارد دبی‌سنج مورد دقت سنجی قرار می‌گیرد.





## فصل سوم: طراحی

### ۳-۱- طراحی و مشخصات طرح

برای طراحی و تعیین قطعات برای ساخت دبی‌سنج حرارتی لوله مویی ابتدا نیاز است چند پارامتر که در طراحی دبی‌سنج مهم است بررسی شود. یکی از پارامترهای مهم طراحی، آرام بودن جریان در لوله‌ی حسگر و بخش آرام‌ساز می‌باشد. قطر داخلی لوله حسگر مطابق مقاله فرزانه و همکاران ۱,۴ میلیمتر انتخاب شد.

در جدول ۳-۱ رابطه بین قطر فرضی لوله‌ها و عدد رینولدز نشان داده شده است و در محاسبات از روابط زیر نیز استفاده شده است.

$$\Delta P = \frac{32\mu Lv}{d^2} \quad (۱-۳)$$

افت فشار در لوله‌ی حسگر با افت فشار در لوله آرام‌ساز برابر می‌باشد پس خواهیم داشت.

$$\frac{v_{LFE}}{v_s} = \left(\frac{d_{LFE}}{d_s}\right)^2 \quad (۲-۳)$$

برای محاسبات جدول ۳-۱ از مشخصات هوا استفاده شده است، چون در عملیات کالیبراسیون از هوا استفاده می‌شود. بنابراین با داشتن مشخصات هوا، روابط ۳-۱، ۳-۲ و نیز رابطه رینولدز می‌توان پارامترهای جدول مذکور را به دست آورد.

جدول ۳-۱- محاسبات مربوط به قطر لوله‌ها و عدد رینولدز

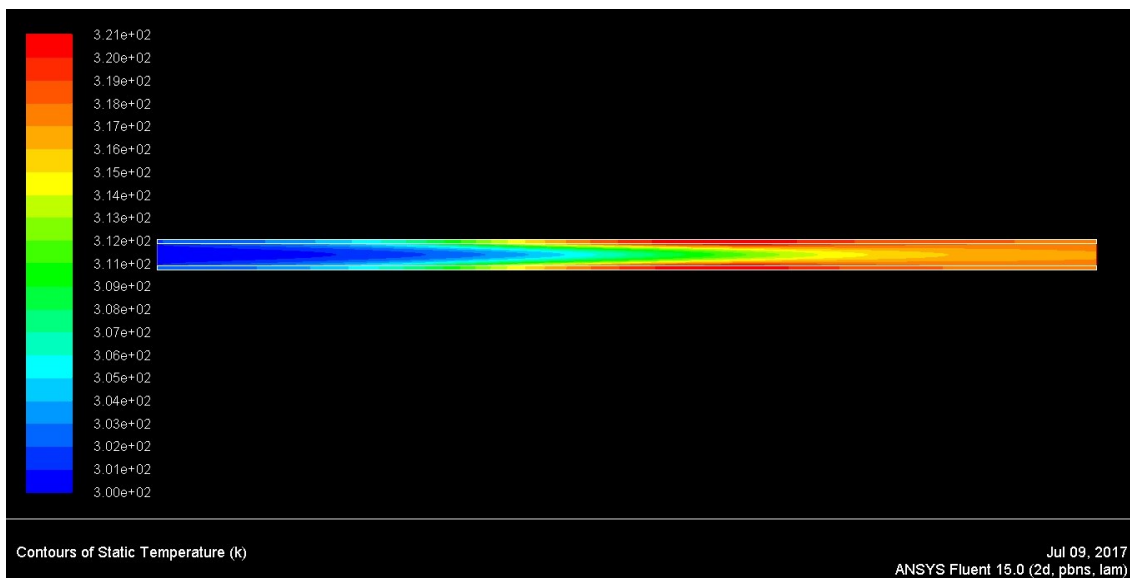
ردیف	قطر لوله‌ی حسگر (mm)	قطر لوله آرام‌ساز (mm)	تعداد لوله در آرام‌ساز	عدد رینولدز $Re$ لوله‌ی حسگر	عدد رینولدز $Re$ آرام‌ساز	سرعت در لوله‌ی حسگر $m/s$	سرعت در آرام‌ساز $m/s$
۱	۱,۴	۳	۲۰	۲۱۹,۲	۲۱۵۷,۴	۲,۵۸	۱۱,۸۷
۲	۱,۴	۳	۲۵	۱۷۵,۴	۱۷۲۵,۹	۲,۰۶	۹,۴۹
۳	۱,۴	۳	۳۰	۱۴۶,۱	۱۴۳۸,۲	۱,۷۲	۷,۹۱
۴	۱,۴	۴	۱۵	۹۲,۴	۲۱۵۷,۴	۱,۰۹	۸,۰۹
۵	۱,۴	۴	۲۰	۶۹,۳	۱۶۱۸	۰,۸۱	۶,۶۷
۶	۱,۴	۴	۲۵	۵۵,۴	۱۲۹۴,۴	۰,۶۵	۵,۳۴
۷	۱,۴	۵	۱۵	۳۷,۸	۱۷۲۵,۹	۰,۴۴	۵,۶۹
۸	۱,۴	۵	۲۰	۲۸,۴	۱۲۹۴,۴	۰,۳۳	۴,۲۷

همان‌طور مشاهده می‌شود قطر لوله‌ی حسگر با لوله آرام‌ساز متفاوت است به این دلیل که اگر قطرهای برابر باشد تعداد لوله در آرام‌ساز بسیار زیاد شده که در فرآیند ساخت عملی نیست. به همین علت از قطرهای متفاوت استفاده شد و با توجه به اینکه افت فشار در دو مسیر برابر است می‌توان نسبت سرعت را به‌دست آورد و از روی نسبت سرعت و نسبت سطح مقطع می‌توان عدد رینولدز و نسبت دبی را به‌دست آورد. [۲۲]

### ۳-۲- لوله‌ی حسگر

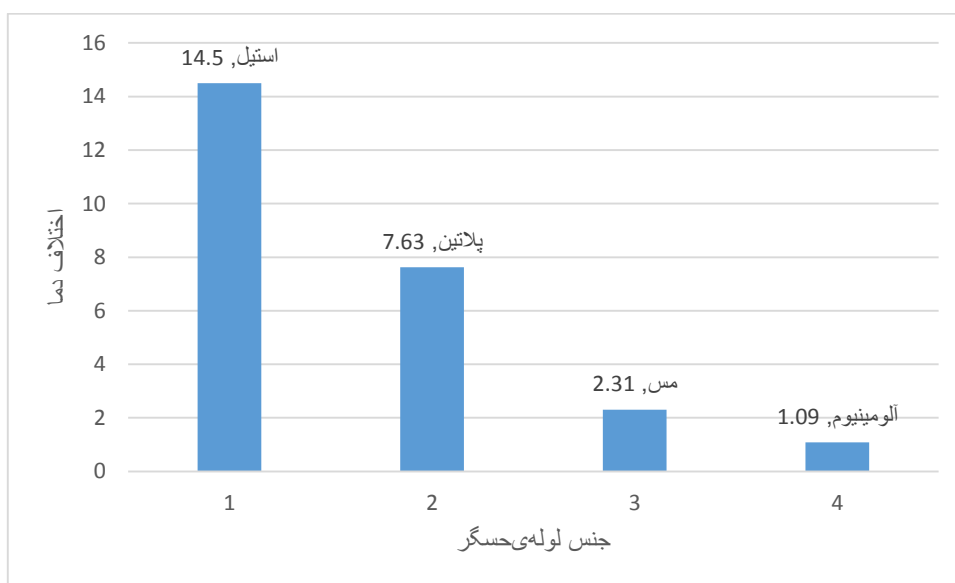
در این پژوهش به لوله‌ای با قطر داخلی ۱,۴۵ با ضخامت ۰,۲ الی ۰,۳ نیاز می‌باشد. در بازار لوله‌های مویی از جنس مس، آلومینیوم و استیل موجود است.

ابعاد تنها مسئله مهم برای انتخاب نیست. در انتخاب لوله‌ی حسگر جنس آن نیز از اهمیت زیادی برخوردار است. رسانش بالا سرعت پاسخگویی بیشتر ایجاد می‌کند ولی از طرفی اگر رسانش در جداره لوله بالا باشد سیال عبوری از لوله نمی‌تواند گرادیان دما ایجاد کند زیرا انتقال حرارت رسانشی در جدار لوله بر انتقال حرارت سیال عبوری غالب می‌باشد. پس مس یا آلومینیوم که به ترتیب ضریب انتقال حرارت رسانشی آن‌ها ۳۸۵ و ۲۰۵ وات بر مترکلون می‌باشد انتخاب مناسبی برای این کار نمی‌باشد. شبیه‌سازی و محاسبات تحلیلی نیز بیانگر این مسئله می‌باشد. در نمونه‌های خارجی این دبی‌سنج از جنس پلاتین با ضریب انتقال حرارت رسانشی ۷۱,۶ وات بر مترکلون می‌باشد و نیز در مقاله کیم و همکاران از جنس استیل استفاده شده که ضریب انتقال حرارت رسانشی آن ۱۲ الی ۴۵ وات بر مترکلون می‌باشد.



شکل ۳-۱: کانتور دما در لوله‌ی حسگر با سرعت جریان ۰,۵ متر بر ثانیه

همان‌طور که در شکل ۳-۱، شبیه‌سازی لوله‌ی حسگر با نرم‌افزار ansys fluent مشاهده می‌شود از کانتور دما در جداره لوله پیداست توزیع دمایی در جدار لوله به‌صورتی است که گرادیان دمای لازم را به ما می‌دهد در صورتی که در جدار لوله با جنسی که ضریب انتقال حرارت آن بالا باشد، اختلاف دما کاهش می‌یابد که این اختلاف دما برای چند جنس مختلف برای لوله‌ی حسگر شبیه‌سازی شده و مقادیر آن برای دبی حداکثر که سرعت آن ۱,۴۲ متر بر ثانیه می‌باشد و شار حرارتی ۱۰۰۰ وات بر مترمربع در شکل ۳-۲ آمده است.





شکل ۳-۲: مقادیر اختلاف دما در دبی حداکثر برای جنس‌های مختلف

پس از این‌رو باید جنس لوله‌ی حسگر دارای ضریب انتقال حرارت رسانش پایین باشد. بنابراین لوله‌ای با قطر خارجی ۲ میلی‌متر و قطر داخلی ۱,۴ میلی‌متر از جنس استیل زنگ نزن به عنوان لوله حسگر ساخته شد که در شکل ۳-۳ آمده است.



شکل ۳-۳: تصویر لوله‌ی حسگر ساخته‌شده از استیل

### ۳-۳- لوله آرام‌ساز

برای این لوله‌ها فرقی ندارد که از چه جنسی باشند. با توجه به جدول ۳-۱ برای قطرهای موردنظر هم لوله مسی و هم آلومینیومی موجود است. برای بخش آرام‌ساز از لوله مسی استفاده شده است. جنس بدنه از ورق برنج می‌باشد و از طرفی مس نسبت به آلومینیوم راحت‌تر به آن جوش می‌شود و چون آلومینیوم دمای ذوب پایین‌تری دارد (نقطه ذوب مس، آلومینیوم به ترتیب حدوداً در دمای ۱۰۸۳ و ۶۶۰ درجه سانتی‌گراد می‌باشد) جوشکاری آن سخت‌تر و ضعیف‌تر است. برنج آلیاژی از مس و روی می‌باشد، البته عناصر دیگری هم ممکن است در آن باشد که قابل چشم‌پوشی است. نقطه ذوب آلیاژ برنج حدود ۱۰۰۰ درجه سانتی‌گراد می‌باشد.

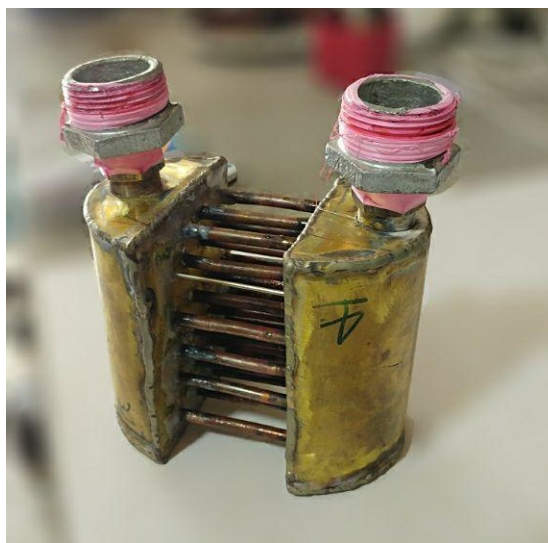
از لوله مسی با قطر خارجی ۶ میلی‌متر و قطر داخلی ۳,۴ میلی‌متر استفاده شده است. بدنه کار کاملاً از ورق برنج با ضخامت ۱,۵ میلی‌متر استفاده شده است که با این ضخامت هم استحکام کافی دارد و

هم دستگاه سبک‌تر می‌شود. لوله‌ها به ورق برنجی سوراخ‌کاری شده با جوش آرگون و سیم جوش نقره، جوش می‌شود. برای جوشکاری به فاصله ۱ سانتی متری بین لوله‌ها نیاز است که ۲۲ لوله در بخش آرام‌ساز جای گرفت. لوله‌ی حسگر هم که از جنس استیل بوده نمی‌توان به ورق برنج جوش داد. برای کاهش هزینه و سهولت جوش به‌ناچار جنس دستگاه برنج و مس در نظر گرفته شد. لوله‌ی حسگر هم با چسب فولاد به بدنه متصل شد که این چسب تا ۱۳۵ درجه سانتی‌گراد حرارت را تحمل می‌کند و قابل تراشکاریست و نیز با پوششی که دارد کاملاً درز را گاز بند می‌نماید.



شکل ۳-۴: تصویر لوله مسی بخش آرام‌ساز با قطر خارجی ۶ میلی‌متر

در نهایت شکل قطعه اولیه که ساخته شد در شکل ۳-۵ آمده است.



شکل ۳-۵: تصویر بخش مکانیکی دی‌سنج ساخته‌شده

با توجه به لوله‌های انتخابی شاخص‌های طراحی به شکل زیر شد. عدد رینولدز در لوله‌ی حسگر و لوله‌های آرام‌ساز در ۴ دبی که در تست‌ها به کار می‌رود مطابق جدول ۳-۲ می‌باشد.

جدول ۳-۲- روابط بین دبی عبوری و عدد رینولدز در لوله‌ی حسگر و آرام‌ساز

دبی بر حسب مترمکعب بر ساعت	لوله‌ی حسگر		لوله‌های آرام‌ساز	
	رینولدز	سرعت (متر بر ثانیه)	رینولدز	سرعت (متر بر ثانیه)
۰,۰۴	۰,۸	۰,۰۰۹	۱۱,۵۲	۰,۰۵
۰,۰۸	۱,۶۱	۰,۰۱۸	۲۳,۰۷	۰,۱۱
۱,۲	۲۴,۱	۰,۲۸	۳۴۶,۱	۱,۶۸
۶	۱۲۰,۸	۱,۴۲	۱۷۳۰,۵	۸,۴

نسبت دبی عبوری از آرام‌ساز به لوله‌ی حسگر:

$$\dot{m}_{LFE} / \dot{m}_{sensor\ tube} =$$

765.29

همان‌طور که مشاهده می‌شود جریان در هر دو مسیر آرام می‌باشد و عدد رینولدز در لوله‌ی حسگر در دبی حداکثر نزدیک به عدد رینولدز در شبیه‌سازی سه‌بعدی پایان‌نامه پرویزی که ۸۵,۷۴ بود، می‌باشد. [۲۳]

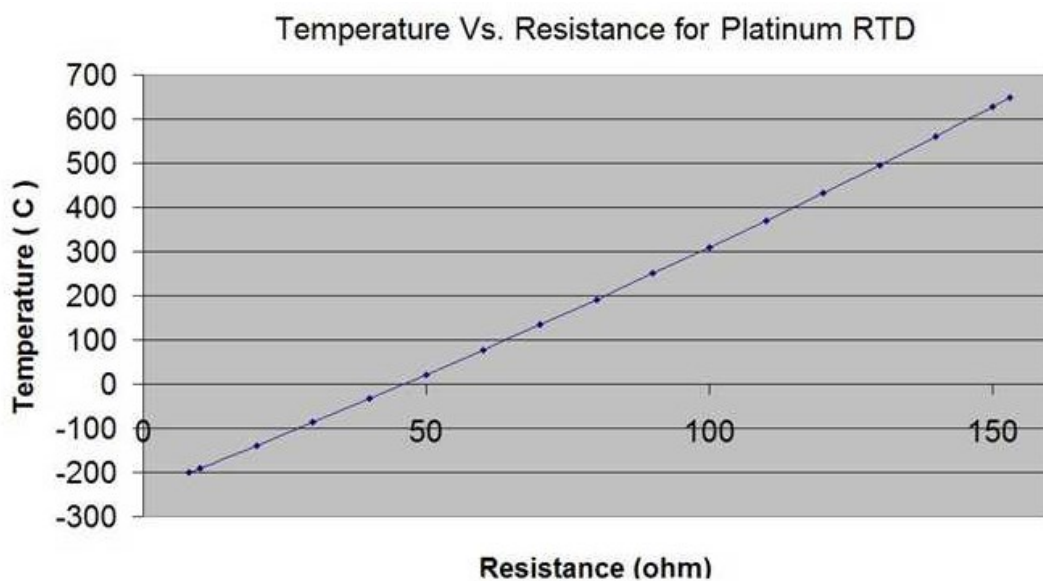
از طرفی میزان افت فشار در لوله‌ها باید بسیار کم باشد که استاندارد میزان افت فشار حداکثر ۳ میلی‌بار می‌باشد. طبق فرمول محاسبه افت (۱-۳) میزان افت فشار برابر ۰,۱۵ میلی‌بار می‌باشد. اگر از فرمول بلازیوس استفاده شود نیز ۰,۲ میلی‌بار افت فشار به دست می‌آید. این فرمول برای  $400 < Re < 10^5$  استفاده می‌شود.

$$\Delta P = 0.158 L \rho \frac{3}{4} \mu \frac{1}{d^4} \frac{-5}{4} v^7 \quad (3-3)$$

### ۳-۴- حسگر دما

برای اینکه بیشترین دقت و عملکرد را در تشخیص دما صورت گیرد حسگر دما مدل PT100 کلاس A می باشد که به آن ها حسگرهای مقاومتی خطی نیز می گویند. این حسگر نسبت به بقیه حسگرها عملکرد مناسبتری دارد. از مزایای آن می توان به موارد زیر اشاره کرد:

۱- عملکرد خطی در کل بازه اندازه گیری



شکل ۳-۶: تغییرات مقاومت حسگر نسبت به دما [۲۴]

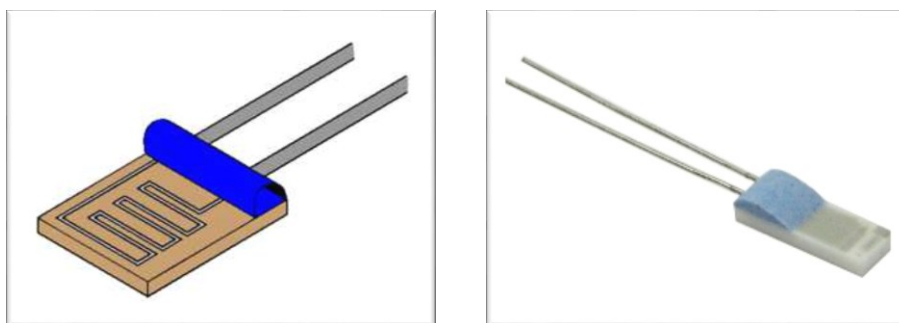
۲- دقت و حساسیت اندازه گیری بسیار بالا

۳- بازه اندازه گیری نسبتاً خوب

۴- پایداری خوب در دماهای بالا

۵- سرعت پاسخ بالا به تغییرات دما

۶- امکان استفاده از سیم رابط معمولی



شکل ۳-۷: تصویر حسگر pt100 استفاده شده در دبی سنج [۲۴]

البته علی رقم داشتن مزایای بالا، در این حسگر خطای خود گرمایی دیده شده است. این حسگرها دارای مقاومت متغیر حدود ۰,۱ اهم بر درجه سانتی گراد در بازه کاری پروژه حاضر هستند. یعنی با افزایش یا کاهش هر صد درجه دما، میزان مقاومت حسگر حدود  $\pm 0,07$  اهم تغییر می‌شود. این حسگرها دارای دو پایه هستند. با تغییرات مقاومت حسگر، ولتاژ دو سر مقاومت نیز تغییر می‌کند. [۲۵]

### ۳-۵- مدار الکترونیکی

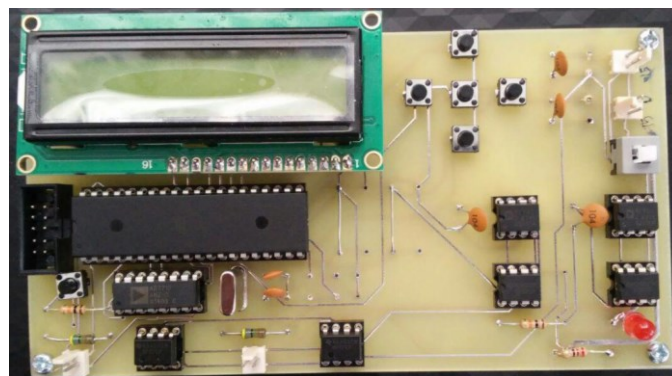
برای اینکه در این پروژه محاسبات سنگین صورت نمی‌گیرد و نیازی به ابزار پیچیده‌تری نیست، مدار الکترونیکی از نوع AVR انتخاب شده است. در طراحی مدار با توجه به حساسیت بالای اندازه‌گیری دما، مدار الکترونیکی باید در خطی‌ترین حالت ممکن در حال کار باشد و هر چه نقطه‌ی کار از منبع دورتر باشد، نتیجه خطی‌تر است. حسگر انتخاب شده برای این مدار دارای مقاومت خطی متغیر با دما بوده و مؤلفه‌ی غیرخطی بسیار کوچکی دارد. برای استفاده از این ویژگی، از یک منبع جریان بسیار دقیق ثابت برای تحریک حسگر استفاده شده است.

برای از بین بردن خطاهای محیطی و مداری نیز از اندازه‌گیری تفاضلی استفاده شده تا دقت مدار چند برابر شود.

اختلاف دمای گزارش شده توسط مدار الکترونیکی با توجه به خطی بودن مدار، نیازمند دو عدد ثابت در معادله‌ی خط راست می‌باشد که از طریق درون‌یابی با استفاده از دو نقطه مشخص از خط انجام می‌شود. این دو نقطه توسط کاربر تعیین می‌شوند به این صورت که در دو اختلاف دمای مختلف، نتایج محاسبات ثبت می‌گردد و اختلاف دماهای انتخاب شده نیز به سیستم گزارش می‌شوند. برای نگهداری از مقادیر کالیبراسیون از حافظه‌ی EEPROM داخلی AVR استفاده شده است.

با توجه به آنکه این طراحی تنها یک نمونه اولی است، تلاشی برای ایمنی دستگاه در برابر حوادث مختلف انجام نشده است و هدف طراحی، دستیابی به بهترین دقت اندازه‌گیری با کمترین توان و هزینه بود. برای ایمنی دستگاه برای نمونه نهایی، شاید نیاز باشد از میکروکنترلرهای مقاوم‌تری مانند سری نظامی میکروکنترلرهای ARM استفاده شود، علاوه بر آن باید نوع طراحی مدار نیز بسته به فشار احتمالی وارده به مدار تغییر کند.

در نهایت مدار الکترونیکی با توصیفی که پیش‌تر بیان شد، طراحی و ساخته شد که شکل سخت‌افزار آن در شکل ۳-۸ آمده است و نیز نقشه مدار الکترونیکی در بخش پیوست ضمیمه شده است.



شکل ۳-۸: تصویر سخت‌افزار مدار الکترونیکی دبی‌سنج

### ۳-۶- منبع تغذیه

برای تغذیه مدار الکترونیکی باید از دو منبع ۱۵ ولت با ظرفیت ۳ آمپر استفاده شود. برای همین از دو ترانس ۲۴ ولت برای این مدار استفاده شده است. از طرفی جریان بالا باعث گرم شدن IC می‌شود به

همین خاطر برای اینکه در طول آزمایش‌ها مدار الکترونیکی دچار مشکل احتمالی نشود، تغذیه المنت حرارتی از مدار الکترونیکی جدا شده است. برای این کار از یک ترانس ۲۴ با ظرفیت ۳ آمپر استفاده شده و برای ایجاد اختلاف پتانسیل دقیق و با ثبات برای تغذیه مدار الکترونیکی و المنت حرارتی از ماژول آماده به نام دیمر کاهنده استفاده شده است که با استفاده از پتانسیومتر آن می‌توان روی ولتاژ دلخواه تنظیم نمود.



شکل ۳-۹: تصویر منبع تغذیه

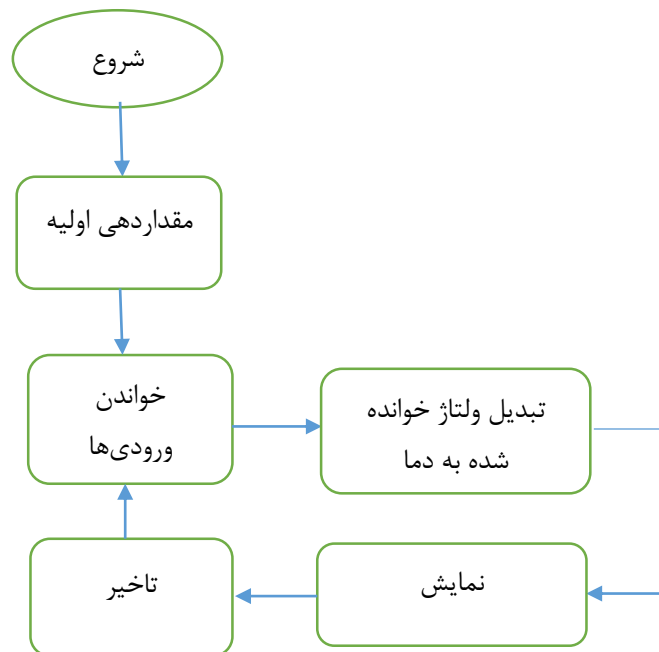
### ۳-۷- المنت حرارتی

به دلیل نبودن المنت حرارتی آماده در این ابعاد از سیم المنت حرارتی در بخاری برقی استفاده شد. سیم المنت به دور لوله‌ی حسگر به اندازه ۲ سانتی‌متر از لوله بر روی کاغذ نسوز پیچیده شد و دو سر آن به منبع تغذیه متصل است. سپس دو حسگر به فاصله ۱ سانتی‌متر در قبل و بعد آن با چسب سیلیکون متصل می‌شود.

### ۳-۸- کدنویسی مدار

برای محاسبه دبی عبوری از لوله‌ی حسگر تنها نیاز به اختلاف دما است، بنابراین در کدنویسی برای محاسبه اختلاف دما کد به شکل تفاضلی نوشته شده است. روش تفاضلی از دقت بالاتری برخوردار است نسبت به اینکه دمای هر حسگر جداگانه محاسبه شود، سپس اختلاف آن به دست آید. البته چون حسگر PT100 در دستگاه استفاده می‌شود و این حسگر غیرخطی می‌باشد، باید در برنامه‌نویسی

پروژه خطی سازی آن نیز انجام شود. در این کدنویسی از زبان C استفاده شده است سپس با استفاده از نرم افزار CodeVisionAVR Advanced 3.12 روی IC مدار برنامه ریزی شده است. در ضمن در مدار الکترونیکی امکاناتی تعبیه شده است که بتوان ثابت کالیبراسیون را وارد کرده سپس دبی عبوری مشاهده شود. علاوه بر این تنظیماتی برای کالیبراسیون مدار الکترونیکی و نیز قابلیت حافظه قرار داده شده است که اگر برق دستگاه قطع شود اطلاعات آن از بین نرود. همچنین این مدار توانایی تغذیه المنت حرارتی را دارد و تمهیداتی برای آن قرار داده شده است ولی برای اطمینان از آسیب ندیدن مدار الکترونیکی در تستها قسمت المنت حرارتی جداگانه طراحی شد. فلوجارت برنامه این مدار مطابق شکل ۱۰-۳ است.



شکل ۱۰-۳: فلوجارت برنامه مدار الکترونیکی

در بخش مقداردهی اولیه یا initial مواردی چون صفحه نمایش، دکمه‌ها، AD (تبدیل آنالوگ به دیجیتال) و غیره راه اندازی می‌شود. مرحله بعد خواندن ورودی‌هاست که همان ولتاژ حسگرها می‌باشد که خوانده می‌شود. سپس ولتاژ خوانده شده در مرحله بعد تبدیل به دما می‌شود و در نهایت به نمایش درمی‌آید. این چرخه هر ۱۰ میلی ثانیه تکرار می‌شود.



### ۳-۹- نحوه کار مدار الکترونیکی

مدار الکترونیکی قابلیت اندازه‌گیری اختلاف دما بین دو حسگر را دارد. بر روی مدار الکترونیکی کلیدهایی تعبیه شده برای کنترل و مشاهده قسمت‌های مختلف مدار الکترونیکی از آن استفاده می‌شود. با فشار دادن دکمه‌های چپ و راست به بخش‌های مختلفی از جمله نمایش دما، نمایش دبی، بخش کالیبراسیون، تنظیمات دستگاه و ... می‌رود. برای ورود به بخش‌ها از کلید وسط استفاده می‌شود. در قسمت دیگری دکمه‌ای برای راه‌اندازی مجدد تعبیه شده است و همچنین در بخش تنظیمات منو گزینه reset factory تعبیه شده تا در صورت نیاز اطلاعات به حالت اولیه برگردد.

### ۳-۱۰- نحوه کالیبراسیون مدار الکترونیکی

در منوی مدار الکترونیکی بخشی به نام کالیبراسیون قرار دارد که سه قسمت مستقل دارد. برای کالیبره کردن مدار الکترونیکی به دو ظرف آب داغ و سرد و نیز به یک دماسنج دقیق برای اندازه‌گیری دما نیاز است. دماسنج مرجع کالیبراسیون ما از نوع PT100 با غلاف ۱۰ سانتیمتری می‌باشد که دارای گواهی کالیبراسیون می‌باشد که تصویر گواهی آن در بخش ضمیمه آمده است. کالیبراسیون این دماسنج در پنج دما بین صفر تا صد انجام شده است. میزان عدم قطعیت در آزمایش‌ها ۰,۱۵ محاسبه شده است. مقدار عدم قطعیت در این کالیبراسیون حدود  $\pm 0,15$  می‌باشد. تصویر دماسنج و نمایشگر آن مطابق شکل ۳-۱۱ است.



شکل ۳-۱۱: تصویر دماسنج و نمایشگر

شرح هر قسمت کالیبراسیون به صورت زیر است.

۱. کالیبراسیون تفاضلی: در این بخش دو حسگر را برای اندازه گیری اختلاف دمای بین دو نقطه کالیبره می شود. این قسمت دو مرحله دارد. در مرحله اول دو حسگر در حمام آب سرد فرو می رود و اختلاف دمای صفر در مدار الکترونیکی وارد می شود سپس با فشردن دکمه وسط مرحله دوم آغاز می شود، حال حسگری که قرار است در بالادست جریان قرار بگیرد را در حمام آب داغ قرار داده و اختلاف دمای دو حمام آب را که با دماسنج دقیق به دست آمده در مدار الکترونیکی وارد می شود، با فشردن دکمه وسط در مدار الکترونیکی این مرحله کامل می شود.

۲. کالیبراسیون تنها: این قسمت برای این قرار داده شده است که دمای هر حسگر را با دقت پایین محاسبه کرده تا اگر دما از بازه طراحی حسگر بالاتر رود، با نمایشگر که روی مدار تعبیه شده اطلاع دهد. این بخش نیز دو مرحله دارد، ابتدا دو حسگر در حمام آب سرد قرار می گیرد و دمای آب سرد در مدار الکترونیکی ثبت می شود. سپس با فشردن کلید وسط به مرحله دوم می رود که در این مرحله هر دو حسگر در حمام آب گرم قرار می گیرد و دمای آب گرم نیز ثبت می شود. با فشردن کلید وسط روی مدار الکترونیکی این مرحله نیز کامل می شود.

۳. کالیبراسیون صفر: این قسمت برای صفر کردن اختلاف بین دو دماسنج طراحی شده است. پس از انجام کالیبراسیون های ذکر شده در قسمت ۱ و ۲ باید دو حسگر را روی هم قرار داده و با فشردن کلید وسط روی مدار الکترونیکی اختلاف بین دو حسگر صفر می شود.

بدین شکل عملیات کالیبراسیون مدار الکترونیکی کامل شده است و آماده برای اضافه شدن به دبی سنج می باشد.

### ۱۱-۳- تجهیزات کالیبراسیون

برای انجام تست‌ها و کالیبراسیون دبی‌سنج از تجهیزات کالیبراسیون شرکت صنعت گاز شمال واقع در شهر قائم‌شهر و شرکت تتیس واقع در منصورکنده بابل استفاده شده است. تجهیزاتی که این شرکت برای انجام کالیبراسیون استفاده می‌کند شامل بل پرور است. هوا توسط بل پرور با فشار یکنواخت و دبی موردنظر به سمت کنتورها که به صورت سری به هم متصل‌اند، جریان پیدا می‌کند و در انتها از شیر موردنظر خارج می‌شود. شکل ۱۲-۳-۱ نمایی از یک واحد کالیبراسیون می‌باشد.



شکل ۱۲-۳-۱: تصویر تجهیزات میز کالیبراسیون

### ۱۲-۳- شرایط و استانداردهای کالیبراسیون

دقت سنجی (کالیبراسیون): مجموعه عملیاتی است که تحت شرایط خاص رابطه بین مقادیر نشان داده شده به وسیله یک کنتور و مقادیر متناظر با آن که به وسیله یک استاندارد (کنتور) مرجع تحقق می‌یابد را مشخص می‌نماید به ترتیبی که دقت کنتور با استاندارد (کنتور مرجع) مقایسه می‌گردد. [۲۶]

دوره کالیبراسیون: عبارت است از فاصله زمانی بین دو بار عملیات متوالی کالیبراسیون اندازه‌گیری: مجموعه عملیاتی است که هدف آن تعیین اندازه یک کمیت می‌باشد.

مقدار واقعی حجم گاز عبوری: عبارت است از حجم گاز عبوری از کنتور با فشار و دمایی که گاز در ورودی کنتور دارد.

مقدار استاندارد حجم گاز عبوری: عبارت است از حجم گازی که از کنتور تحت شرایط استاندارد عبور می‌کند.

فشار کاری: عبارت است از اختلاف فشار گاز ورودی کنتور با فشار جو.

حداکثر فشار کاری: عبارت است از حداکثر فشار کاری که برای هر کنتور توسط سازنده مشخص می‌گردد.

افت فشار: عبارت است از اختلاف بین فشار گاز در ورودی و خروجی کنتوری که در حال کار می‌باشد. نشتی: عبارت است از گاز خارج شده از قسمت‌های مستقل از هم در داخل کنتور و یا از کنتور به خارج آن.

خطای کنتور: مقداری است برحسب درصد که اختلاف بین مقدار اندازه‌گیری شده و مقدار واقعی حجم گاز عبوری از کنتور را نسبت به مقدار واقعی آن نشان می‌دهد و بر اساس رابطه زیر محاسبه می‌گردد:

$$e (\%) = \frac{Q_p - Q_m}{Q_m} \times 100 \quad (4-3)$$

که در آن  $e$  مقدار خطای اندازه‌گیری به درصد می‌باشد و  $Q_p$  مقدار گاز اندازه‌گیری شده توسط کنتور تحت آزمون و  $Q_m$  مقدار واقعی گاز عبوری نشان داده شده توسط کنتور مرجع می‌باشد.

کمترین ظرفیت: کمترین مقدار حجم گاز عبوری از کنتور می‌باشد که می‌تواند در محدوده حداکثر خطای مجاز تعریف شده به وسیله آن اندازه‌گیری گردد.

بیشترین ظرفیت: بیشترین مقدار حجم گاز عبوری از کنتور می‌باشد که می‌تواند در محدوده حداکثر خطای مجاز تعریف شده به وسیله آن اندازه‌گیری گردد.

شرایط استاندارد: عبارت است از شرایطی که دما برابر ۱۵,۵۶ درجه سلسیوس (۶۰ درجه فارنهایت) و فشار برابر با ۱۰۱۳,۲۵ میلی‌بار (۱۴,۶۹۶ psi) باشد. [۲۶]

درستی (صحت) ابزار اندازه‌گیری: توانایی یک ابزار اندازه‌گیری برای دادن پاسخی نزدیک به مقدار واقعی را درستی (صحت) ابزار اندازه‌گیری می‌نامند.

عدم قطعیت: درجه اطمینانی است که می‌توان برای دقت اندازه‌گیری یک وسیله اندازه‌گیری یا فرآیند اندازه‌گیری در نظر گرفت. این پارامتر همراه با نتیجه اندازه‌گیری، مشخص‌کننده پراکندگی مقادیری که منطقیاً به کمیت اندازه‌گیری نسبت داده می‌شود، می‌باشد.

محیط کالیبراسیون:

۱. آزمایشگاه باید دارای فضای محصور و مسقف متناسب با ظرفیت کاری خود برای نگهداری کنتورهای دریافتی در طول فرآیند کالیبراسیون باشد.

۲. اتاق کالیبراسیون باید مستقل از محیط‌هایی باشد که سایر فعالیت‌های آزمایشگاه انجام می‌گردند.

۳. کنتورها می‌بایست در فشار اتمسفریک محیط آزمایشگاه کالیبره گردند.

۴. دما، فشار و رطوبت اتاق کالیبراسیون می‌بایست توسط تجهیزات کالیبره و نصب شده مناسب در آن ثبت و ذخیره گردند.

۵. اتاق کالیبراسیون باید از نظر دما و رطوبت ایزوله باشد به طوری که تثبیت دما و رطوبت در دامنه‌های تعریف شده و در طول فرآیند کالیبراسیون ثابت بماند.

تجهیزات کالیبراسیون:

۱. اتاق کالیبراسیون باید مجهز به سیستم‌های حرارتی / برودتی و رطوبت سازی مناسب جهت تأمین هوا و رطوبت کنترل شده در دامنه‌های موردنظر باشند.
۲. اتاق کالیبراسیون باید مجهز به نمایشگر و ثبت‌کننده دمای هوای اتاق حداقل در طول فرآیند کالیبراسیون باشد.
۳. اتاق کالیبراسیون باید مجهز به نمایشگر و ثبت‌کننده رطوبت حداقل در طول فرآیند کالیبراسیون باشد.
۴. اتاق کالیبراسیون باید مجهز به نمایشگر و ثبت‌کننده فشار بارومتریک محل آزمون باشد.
۵. تمام دستگاه‌ها و تجهیزات نشان‌دهنده و ثبت‌کننده، دما، فشار، اختلاف فشار و رطوبت باید دارای گواهینامه معتبر از مراکزی باشند که صلاحیت صدور گواهینامه در این زمینه را دارند.
۶. آزمایشگاه کالیبراسیون باید مجهز به یکی از تجهیزات مرجع ذیل جهت انجام کالیبراسیون باشد:

- دبی‌سنج مرجع

- سیستم اندازه‌گیری نازل<sup>۱</sup> یا اوریفیس<sup>۲</sup>

۷. دقت تجهیزات مرجع کالیبراسیون باید حداقل ۳ برابر بهتر از دقت مورد سنجش در فرآیند کالیبراسیون باشد.

تست نشتی: قبل از شروع کالیبراسیون، لازم می‌باشد تا تست نداشتن نشتی در خطوط تست مورد بررسی و آزمایش قرار گیرد و تمهیدات لازم و مطمئن در برنامه نرم‌افزار آن برای این منظور پیش‌بینی گردد و در فرآیند نشت‌سنجی سیستم آزمون مورد استفاده قرار گیرد.

با انتخاب گزینه (آزمون نشتی) در منوی برنامه نرم‌افزار سیستم تست، عبور هوا با فشار (۵، ۰) الی (۱) ± بار از خطوط تست (شامل کنتور تحت آزمون، لوله، اتصالات و متعلقات مربوطه)، می‌بایست

---

<sup>۱</sup> Nozzle

<sup>۲</sup> Orifice

عدم وجود نشتی از طریق کنترل افت فشار با عبور جریان هوا به مدت حداقل ۵ دقیقه، توسط دستگاه ثبت و گزارش گردد. [۲۶]

بعد از تست نشتی عملیات کالیبراسیون انجام می‌شود.

عملیات کالیبراسیون: برای کنتورهای گاز خانگی عملیات کالیبراسیون در ۴ دبی متفاوت انجام می‌شود. ابتدا با چند تعریف شروع می‌کنیم:

دبی حداقل ( $Q_{min}$ ): کمترین مقدار جریان گاز عبوری از وسیله اندازه‌گیری جریان می‌باشد که آن وسیله می‌تواند در محدوده خطای تعریف‌شده اندازه‌گیری نماید.

دبی حداکثر ( $Q_{max}$ ): بیشترین مقدار جریان گاز عبوری از وسیله اندازه‌گیری جریان می‌باشد که آن وسیله می‌تواند در محدوده خطای تعریف‌شده اندازه‌گیری نماید. میزان دبی حداکثر برای کنتورهای مختلف به شرح زیر است.

جدول ۳-۳- مقادیر دبی حداکثر برای انواع کنتور [۲۶]

نام	$Q_{max} \text{ m}^3/\text{h}$	Upper limits of $Q_{min} \text{ m}^3/\text{h}$
G2.5	4	0.025
G4	6	0.04
G6	10	0.06
G10	16	0.1
G16	25	0.16
G25	40	0.25

$Q_i$ : مقدار واقعی اندازه‌گیری شده جریان گاز می‌باشد که در شرایط آزمون مشخص از وسیله اندازه‌گیری جریان، عبور می‌کند.

حداکثر خطای قابل قبول (اولیه): در واقع حداکثر خطایی را که یک دبی‌سنج در اولین لحظه تعیین دقت نشان می‌دهد را حداکثر خطای قابل قبول اولیه گویند و با MPE نمایش می‌دهند.

حداکثر خطای قابل قبول<sup>۱</sup>: به حداکثر میزان خطایی که دبی سنج مجاز است در طی تست پایداری و در تکمیل آن نشان دهد را گویند.

میزان این خطاها به مطابق جدول ۳-۴ است.

جدول ۳-۴- میزان حداکثر خطای مجاز برای کنتور [۲۶]

Flow rate m <sup>3</sup> /h	حداکثر خطای مجاز	
	Initial	Endurance
$Q_{min} \leq Q < 0.1 Q_{max}$	±3%	±6%
$0.1 Q_{max} \leq Q \leq Q_{max}$	±1.5%	±3%

فشار ورودی: فشار نرمال ورودی دستگاه باید ۱۸ میلی بار باشد.

سایز اتصالات: اتصالات دبی سنجها به دستگاه تست باید مطابق جدول ۳-۵ باشد.

جدول ۳-۵- سایز اتصالات دستگاه برای کنتورهای مختلف [۲۶]

نام	Q <sub>max</sub> (m <sup>3</sup> /h)	Size (in)
G2.5	4	1 1/4
G4	6	
G6	10	
G10	16	2
G16	25	
G25	40	

افت فشار: میزان افت فشار در دبی سنج باید کمتر یا مساوی ۳ میلی بار باشد.

### ۳-۱۳- مشخصات بل پرور<sup>۲</sup>

دستگاه بل پرور به عنوان سیستم مرجعی برای کالیبره کردن وسایل اندازه گیری گاز در ظرفیت های مختلف و فشار ثابت، مورد استفاده قرار می گیرد. این سیستم با نمایش ظرفیت، فشار و دبی، وسیله

<sup>۱</sup> Endurance

<sup>۲</sup> Bell Prover



مناسبی برای کالیبره کردن کنتورهای گاز تجاری و خانگی می‌باشد. تمامی اطلاعات کنتورهای در حال تست و مشخصات دما، فشار، جابجایی و ... توسط حسگرهای تعبیه شده در دستگاه برای انجام محاسبات، سنجش و ثبت اطلاعات مربوطه به نرم‌افزار مخصوص ارسال می‌شود. کلیه مراحل تست و کنترل دستگاه با نهایت دقت توسط نرم‌افزار ویژه دستگاه انجام می‌گیرد، محیط گرافیکی و کاربرپسند این نرم‌افزار به آسانی اپراتور را مرحله به مرحله برای انجام کامل تست راهنمایی می‌کند.

ویژگی‌های دستگاه بل پرور به قرار زیر است:

- توانایی در تست و کالیبراسیون انواع کنتورهای دیافراگمی، آلتراسونیک و ... در سایزها و ظرفیت‌های مختلف
- سیستم تمام اتوماتیک کالیبراسیون
- نرم‌افزار تحت سیستم‌عامل ویندوز با محیط گرافیکی و User Friendly و با کاربری آسان
- سیستم هوشمند (کالیبره شدن خودکار دستگاه قبل از هر مرحله تست)
- تعیین درصد خطا در کنتورها و تعیین نوع چرخ‌دنده اصلاحی توسط نرم‌افزار
- سیستم تعادل انحصاری برای کالیبره کردن سریع و بدون محدودیت دستگاه
- سیستم تصحیح خطای هم فشاری اولیه
- بهره‌گیری از سیستم ضد تلاطم روغن (اوریفیس روغن)
- محاسبه نوع روغن (روغن با ویسکوزیته خاص)
- کیفیت بالای طراحی و ساخت دستگاه با محاسبه و تصحیح خطاهای ساخت، حجم، دما، فشار و ...

و از امکانات قابل‌ارائه این دستگاه می‌توان به موارد زیر اشاره نمود:

- قابلیت نصب سیستم‌های محاسبه افت فشار هر کنتور

- امکان راه‌اندازی سیستم ثبت قرائت کنتورها و اخذ آمار از دستگاه، تحت وب
- امکان ارائه دستگاه بدون سیستم هوشمند
- قابلیت پیکربندی دستگاه برای کالیبره کردن کنتورهای سایز بالا

مشخصات فنی این دستگاه در شکل ۳-۱۳ آمده است.

شماره سریال بل پرور: zst1015300

شرکت سازنده: ظریف سازه تبرستان

ظرفیت ۳۰۰ لیتر

سال ساخت ۱۳۹۲

Technical Specification	
Meter Type Tested	Diaphragm and Ultrasonic Gas Meters
Tested Fluid	Air (Standard Conditions)
Operating Temperature	21±2 °C
Pressure Drop (Max)	0.5 mbar
Displaced Volume	300 lit
Uncertainty of Volumetric Flow Rate Measurement	±0.2%
Minimum Measurable Volume	0.2 lit
Operating Pressure	18 mbar
Working Humidity Range	Up to 95%
Weight	900 kg
Dimensions	2 x 1.2 x 3 m
Blower Power	470 W
Operating System Software	Microsoft Windows XP, Vista, 7, ...
Test Results	Displayed on Screen Monitor (%Proof, %Accuracy, %Error, %Correction) Accept or Reject Indication Differential Pressure reading displayed during test
Communication of Test Data	RS232
Test Sequence	Microprocessor controlled, User selectable
Automatic Leak Test Cycle	User selects sensitivity and duration of the leak test
Automatic Test Cycle	Automatically Controls Speed to Maintain Selected Flow Rate

شکل ۳-۱۳: کاتالوگ بل پرور استفاده شده در کالیبراسیون [۲۷]

## فصل چہارم: نتائج

#### ۴-۱-مقدمه

پس از اتمام ساخت دبی سنج مورد نظر و بررسی شرایط کالیبراسیون، حال باید دبی سنج مورد تست و دقت سنجی قرار گیرد. در این فصل به تحلیل و بررسی نتایج حاصل از تست‌های گرفته شده پرداخته می‌شود. این تست‌ها در شرکت صنعت گاز شمال واقع در شهرستان قائم‌شهر و نیز تست‌های نهایی در شرکت تتیس بابل تحت شرایط استاندارد انجام شده است.

#### ۴-۲- نحوه کالیبراسیون دبی سنج

برای کالیبره شدن دبی سنج ابتدا باید در میز کالیبراسیون زیر جک قرار داده و پس از تست نشتی، چهار دبی مورد نظر از آن عبور داده شود. از این عملیات چهار اختلاف دما در چهار دبی به دست می‌آید. بعد از آن در نمودار، شیب خط وسط محاسبه شده که ثابت کالیبراسیون تلقی می‌شود. حال ثابت کالیبراسیون در مدار الکترونیکی ثبت می‌شود که دبی را مستقیماً نشان دهد. سپس دوباره چهار دبی مورد نظر از دستگاه عبور داده می‌شود و به مقایسه دبی نشان داده شده در دبی سنج مورد آزمایش و دبی مرجع پرداخته می‌شود تا خطای دبی سنج مشخص شود.

#### ۴-۳- ثابت کالیبراسیون

همان‌طور که در فصل قبل اشاره شده است، میزان دبی عبوری و اختلاف دما در این دستگاه رابطه خطی دارند.

$$\dot{m}_1 = c \cdot \Delta T \quad (1-4)$$

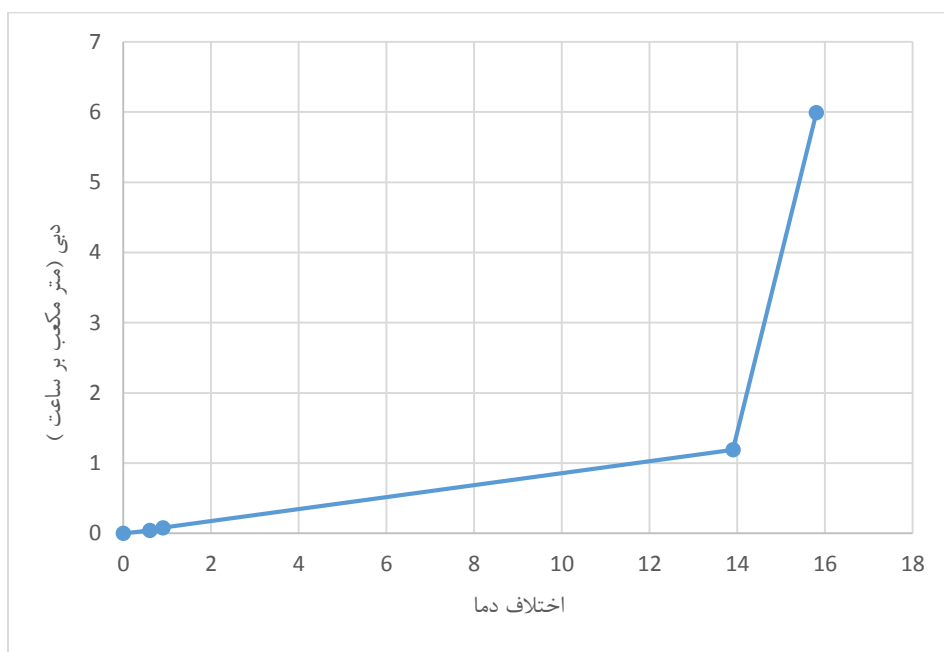
در رابطه بالا مقدار  $\Delta T$  توسط حسگرها در مدار الکترونیکی به دست می‌آید. دبی عبوری از لوله‌ی حسگر با دبی که از بخش آرام‌ساز عبور می‌کند نسبت ثابتی دارد. پس می‌توان  $\dot{m}_1$  را به دبی عبوری کل نسبت داد. دبی کل هم از روی سیستم مرجع که با آن دبی سنج کالیبره می‌شود، مشخص است. وقتی که نمودار اختلاف دما بر حسب دبی مرجع رسم شود، از خط tredline که از میان نقاط

می‌گذرد شیبی حاصل می‌شود که مقدار آن شیب ثابت کالیبراسیون می‌باشد. نقاط به‌دست‌آمده در تست مطابق جدول ۱-۴ می‌باشد.

جدول ۱-۴- نتایج کالیبراسیون دبی‌سنج با لوله حسگر استیل

دبی سیستم مرجع (مترمکعب بر ساعت)	۰	۰,۰۴	۰,۰۸	۱,۱۹	۵,۹۹
اختلاف دما (سانتی‌گراد)	۰	۰,۶	۰,۹	۱۳,۹	۱۵,۸

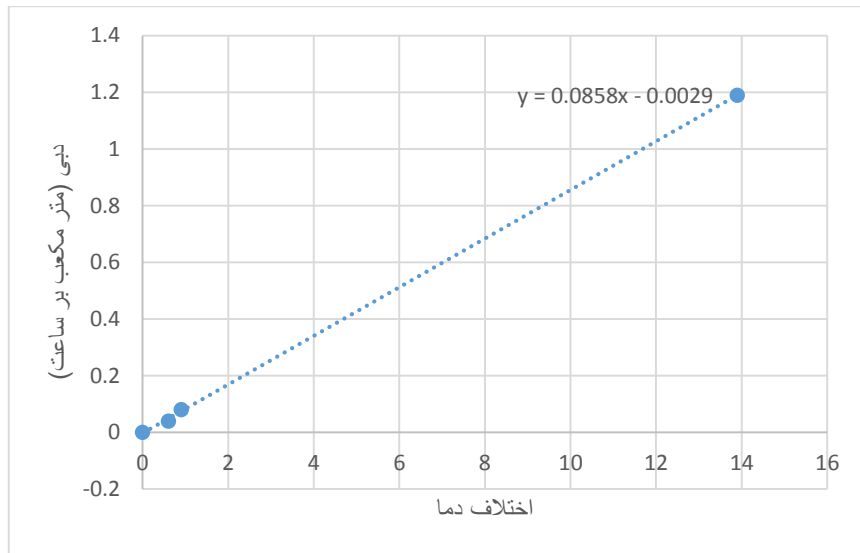
نمودار آن به‌صورت شکل ۱-۴ می‌باشد.



شکل ۱-۴: نمودار مربوط با کالیبراسیون دبی‌سنج

همان‌طور در شکل ۱-۴ مشاهده می‌شود در سه نقطه تا دبی ۱,۲ متر مکعب بر ساعت روند نمودار خطی می‌باشد ولی در دبی حداکثر روند نمودار غیر خطی شده است. بعد از بررسی‌های متعدد و آزمایش‌های مختلف دلایلی که باعث شده روند نمودار در دبی حداکثر غیرخطی شود، مورد بررسی واقع شده است.

مقدار ثابت کالیبراسیون تا دبی ۱,۲ متر مکعب بر ساعت محاسبه می‌شود که مطابق شکل ۲-۴ است.



شکل ۲-۴: نمودار تعیین ثابت کالیبراسیون

مقدار ثابت کالیبراسیون از روی معادله خط به دست می‌آید که برابر ۰,۰۸ می‌باشد. حال این ثابت کالیبراسیون باید در اختلاف دما ضرب شود. مقدار به دست آمده مقدار دبی سیال عبوری می‌باشد که دستگاه آن را محاسبه نموده است.

#### ۴-۴- میزان و نحوه محاسبه خطا

فرمول محاسبه خطا در بخش استانداردها گفته شده است. حال میزان خطا محاسبه می‌شود که در جدول زیر آمده است. در این محاسبات فرض شده که اختلاف دما از ابتدا ثابت شده است یا به عبارتی زمان پاسخگویی بسیار کوتاه می‌باشد.

$$\text{اختلاف دما} * (0.08) \text{ ثابت کالیبراسیون} = \text{دبی دستگاه} \quad (۳-۴)$$

جدول ۴-۲- محاسبه خطای دبی سنج به درصد

خطای مجاز (درصد)	دبی دستگاه (مترمکعب بر ساعت)	دبی مرجع (مترمکعب بر ساعت)	اختلاف دما (سانتی گراد)
۰	۰	۰	۰
±۳	۰,۰۴۸	۰,۰۴	۰,۶
±۳	۰,۰۷۲	۰,۰۸	۰,۹
±۱,۵	۱,۱۱۲	۱,۱۹	۱۳,۹

مطابق جدول ۴-۲ دبی سنج ساخته شده در سه دبی  $Q_{min}$ ,  $2 Q_{min}$ ,  $0.2 Q_{max}$  دقت آن مطابق استاندارد نمی باشد. البته این مسئله دور از ذهن نیست چون دماسنجی که با آن حسگرها کالیبره شده اند، ۰,۱۵ درجه خطا دارد و نیز میزان عدم قطعیت حسگرها  $\pm 0,2$  درجه می باشد، حال در تست انجام شده هر ۰,۱ درجه، خطای محاسبه را به مقدار قابل توجه جابجا می کند. در جدول ۴-۳ میزان خطا بر حسب لیتر نمایش داده شده است.

جدول ۴-۳- محاسبه خطای دبی سنج به لیتر

خطا (لیتر)	دبی عبوری دستگاه (لیتر)	محدوده درستی (لیتر)	دبی عبوری مرجع (لیتر)	زمان تست (ثانیه)	اختلاف دما (سانتی گراد)	دبی مرجع (مترمکعب بر ساعت)
۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰
۱,۴	۱۱,۴	۹,۷_۱۰,۳	۱۰	۸۵۵	۰,۶	۰,۰۴
-۱,۵۲	۸,۴۸	۹,۷_۱۰,۳	۱۰	۴۲۴	۰,۹	۰,۰۸
-۶,۷۱	۹۳,۲۸	۹۸,۵_۱۰۱,۵	۱۰۰	۳۰۲	۱۳,۹	۱,۱۹

میزان افت فشار در دبی سنج نیز مطابق استاندارد بوده است. میزان افت فشار در دبی حداکثر ۱,۵ میلی بار، در دبی ۱,۲ مترمکعب بر ساعت به میزان ۰,۸ میلی بار و نیز در باقی دبی ها افت فشار برابر صفر بوده است. همان طور که گفته شده باید میزان افت فشار بین ورودی و خروجی دبی سنج زیر ۳ میلی بار باشد.

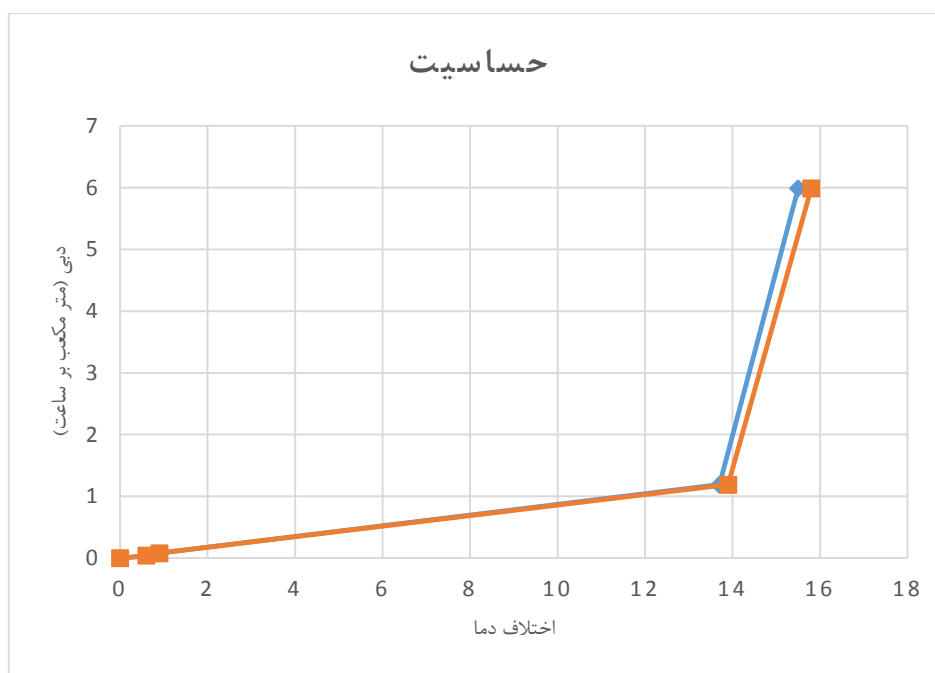
#### ۴-۵- حساسیت پذیری

میزان حساسیت پذیری دستگاه یعنی نتایج حاصل از تکرار تست‌ها به چه میزان به هم نزدیک‌اند. برای این مهم از دستگاه دو بار تست گرفته شد که نتایج آن در جدول ۴-۴ آمده است.

جدول ۴-۴- میزان حساسیت پذیری دبی سنج

اختلاف نتایج (درصد)	اختلاف نتایج	آزمایش دوم	آزمایش اول	دبی (مترمکعب بر ساعت)
۰	۰	۰	۰	۰
۱۶,۶	۰,۱	۰,۷	۰,۶	۰,۰۴
۰	۰	۰,۹	۰,۹	۰,۰۸
-۱,۴	-۰,۲	۱۳,۷	۱۳,۹	۱,۲
-۱,۸	-۰,۳	۱۵,۵	۱۵,۸	۶

نمودار میزان حساسیت مطابق شکل ۳-۴ می‌باشد.



شکل ۳-۴: نمودار میزان حساسیت دبی سنج



#### ۴-۶- تحلیل و بررسی نتایج

همان‌طور که از نتایج پیداست در سه دبی، دقت اندازه‌گیری شده در بازه استاندارد نبوده است ولی روند آن خطی بوده است و نیز در دبی حداکثر روند نمودار غیرخطی شده است. علت‌های متفاوتی می‌توانند دخیل باشند که این نتایج به دست آمده است. می‌توان در روند ساخت به روش دیگری عمل کرد نتایج بهبود پیدا کند ولی مشکلات و موانعی وجود خواهد داشت که در این پروژه با آن مواجه هستیم. که این مسائل در ادامه بررسی می‌شود.

یکی از بحث‌های مهم زمان پاسخگویی می‌باشد. زمان پاسخگویی با توجه به سایز لوله و جنس آن زیاد می‌باشد به طوری که در طول تست دبی حداکثر که مدت زمان ۶۰ ثانیه می‌باشد در پایان تست اختلاف دمای ثابت ۱۵,۸ به دست آمد. این آهستگی افزایش اختلاف دما ناشی از جنس و سایز لوله می‌باشد (در مقاله کیم و همکاران به آن اشاره شده است).

بررسی و تست‌هایی در تغییر مقدار شار حرارتی انجام شد. این بررسی نشان می‌دهد که با افزایش میزان ولتاژ یا در واقع افزایش توان حرارتی، میزان اختلاف دما افزایش می‌یابد. پس ممکن است یکی از عوامل این باشد که میزان شار حرارتی اعمالی به لوله‌ی حسگر کافی نباشد و یا انتقال حرارت در استیل بسیار آهسته باشد که در دبی حداکثر اختلاف دما به مقدار کمی افزایش یابد. مسئله این است که اگر رابطه خطی باشد این اختلاف دما در دبی حداکثر باید بیش از ۴۰ درجه شود که این امر مستلزم توانی است که دما المنت حرارتی و حسگرها بسیار بالا می‌رود و دیگر در بازه طراحی حسگرها نمی‌باشد. در جدول زیر مشخصات دمایی المنت حرارتی و لوله‌ی حسگر مشخص شد که به شرح زیر می‌باشد.

جدول ۴-۵- مشخصات فنی و دمایی المنت و لوله‌ی حسگر

ولتاژ (ولت)	مقاومت (اهم)	توان (وات)	دمای المنت (سانتی‌گراد)	دمای لوله‌ی حسگر قسمت حسگر (سانتی‌گراد)	اختلاف دما (سانتی‌گراد)
۲	۱,۸	۲,۲۲	۱۱۲	۵۲	۱۵,۸
۲,۳۵	۱,۷	۳,۲۴	۱۲۴	۶۰	۱۷,۴

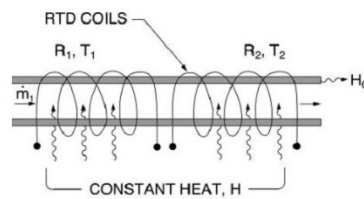
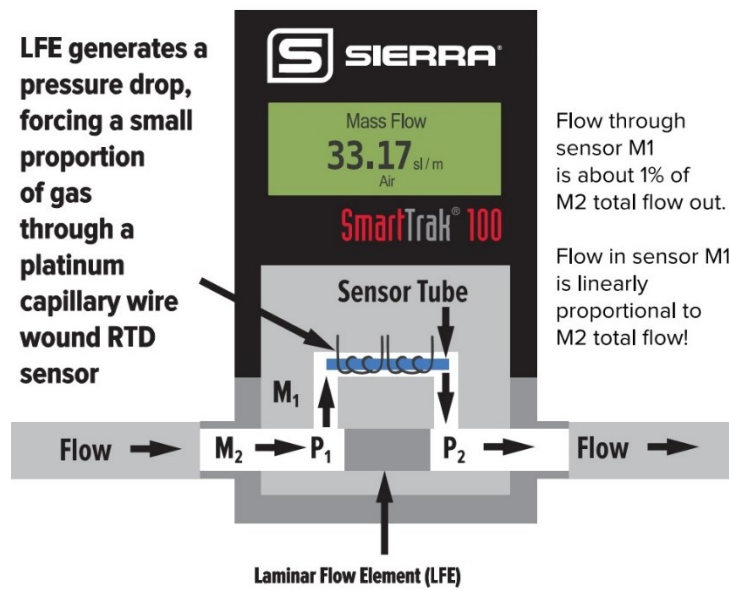
همان‌طور که در شکل ۴-۵ مشاهده می‌شود با افزایش ۰,۳۵ ولت میزان دمای المنت حرارتی به ۱۲۴ درجه سانتی‌گراد رسیده است. اگر برای رسیدن به اختلاف دمای موردنظر دمای المنت بالا رود، دما در محل قرارگیری حسگرها از بازه دمایی که در کدنویسی برای حسگر طراحی شده تجاوز می‌کند و المنت گداخته می‌شود و توان زیادی مصرف می‌شود. بنابراین نمی‌توان این روش را کارآمد دانست. البته ممکن است این مشکل با تغییر جنس لوله‌ی حسگر به جنسی که دارای ضریب انتقال حرارت بالاتری داشته باشد حل شود.

شرکت sierra instrument یکی از کمپانی‌هایی است که در این زمینه فعالیت می‌کند. در محصولاتی که این کارخانه در زمینه دبی‌سنج‌های جرمی حرارتی داشته است، نکاتی که برای مقایسه مهم است ارائه می‌شود. در تمام محصولاتی که ظرفیت جریان ۱۰۰ لیتر در دقیقه را داشته‌اند میزان افت فشار در تمامی آن‌ها حداقل ۲۰ میلی‌بار بوده است. دقت محاسبه آن‌ها  $\pm 1$  درصد بوده است و زمان پاسخگویی آن‌ها کمتر از ۵ ثانیه می‌باشد و نیز تکرارپذیری آن  $\pm 0,2$  درصد می‌باشد. دیگر مشخصات در کاتالوگ‌های این وب‌سایت موجود است. شکل لوله‌ی حسگر که در این دبی‌سنج‌ها استفاده شده است به صورت شکل ۴-۴ می‌باشد.



شکل ۴-۴: تصویر لوله‌ی حسگر [۵]

طبق اطلاعاتی که در فایل‌های این وبسایت موجود است، از لوله‌ی حسگری با قطر خارجی حدود ۰,۵ میلی‌متر استفاده می‌شود. و همان‌طور که در شکل مشخص است المنت حرارتی و حسگرها با چه ظرافت و دقتی طراحی و نصب شده‌اند که اگر چنین طرح در پروژه حاضر استفاده شود نیاز به تیم طراحی از رشته برق و هزینه و زمان بیشتری است که پژوهشی جداگانه نیاز دارد. مشخص است که وقتی حسگرها به این شکل طراحی شوند پوشش بهتری رو تیوب دارند و تغییرات دمایی را بهتر حس می‌کنند و از طرفی حسگری با دقت زیر ۰,۱ درجه طراحی می‌شود. در نتیجه با داشتن حسگری با دقت زیر ۰,۱ درجه می‌توان به نتایجی در بازه استاندارد رسید. اما در مورد قطر لوله‌ی حسگر، هر چه قطر لوله‌ی حسگر کمتر باشد نمودار دبی نسبت به اختلاف دما خطی‌تر و دارای دقت بیشتری خواهد بود. دبی‌سنج‌های ساخته شده برای گازهای تمیز طراحی شده‌اند و مطمئناً چنین ابعادی از لوله‌ی حسگر مناسب نخواهد بود. جنس لوله استفاده شده در دبی‌سنج شرکت مذکور از پلاتین می‌باشد.



**Direct thermal mass flow does not need any T or P compensation requiring complicated calculations with flow computers**

FIRST LAW OF THERMODYNAMICS  
(HEAT IN = HEAT OUT)  
 $H = \dot{m}_1 C_p (T_2 - T_1) + H_0$

$$\dot{m}_1 = \frac{H - H_0}{C_p \Delta T}$$

Close up of capillary sensor.

شکل ۴-۵: تصویر شماتیک دبی‌سنج [۵]

اگر از پلاتین به عنوان جنس لوله‌ی حسگر استفاده شود به دلیل انتقال حرارت رسانشی بیشتر نسبت به استیل ممکن است بهتر عمل کند. برای پی بردن به این مسئله تست‌هایی با دبی‌سنج دیگری انجام شد، که لوله حسگر آن از جنس مس بوده است و مابقی مشخصات با دبی‌سنج توضیح داده شده قبلی یکسان می‌باشد. در این دبی‌سنج، سرعت پاسخگویی بالا و نسبت خطی بین اختلاف دما و دبی به دست آمد ولی چون اختلاف دمای پایینی در اثر عبور جریان حاصل شد، خطای محاسبه شده زیاد می‌باشد. شکل ۴-۶ نمایی از دبی‌سنج با لوله حسگر مسی می‌باشد.



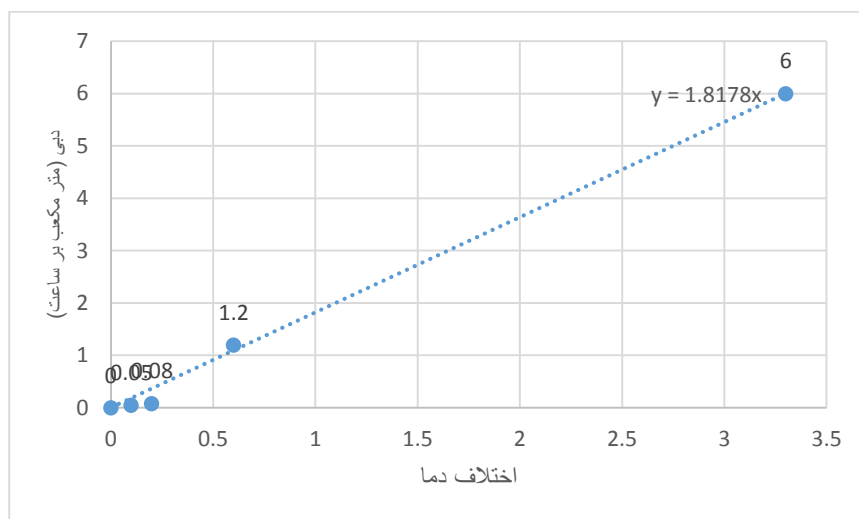
شکل ۴-۶: نمایی از دبی سنج با لوله حسگر مسی و محیط کالیبراسیون

نتایج حاصل از تست دبی سنج با لوله حسگر مسی مطابق جدول ۴-۶ می باشد.

جدول ۴-۶- نتایج کالیبراسیون دبی سنج با لوله حسگر مس

دبی سیستم مرجع (مترمکعب بر ساعت)	۰	۰,۰۵	۰,۰۸	۱,۲	۶
اختلاف دما (سانتی گراد)	۰	۰,۱	۰,۴	۰,۶	۳,۳

نمودار نتایج نشان داده شده در جدول ۴-۳ در شکل ۴-۷ آمده است.



شکل ۴-۷: نمودار نتایج کالیبراسیون برای دبی سنج با لوله حسگر مسی

در شکل ۴-۷ مشخص است که روند تغییرات اختلاف دما بر حسب دبی در دبی سنج با لوله حسگر مسی، خطی می باشد. پس از این رو می توان نتیجه گرفت که افزایش ضریب انتقال حرارت رسانشی

باعث می‌شود میزان خطی بودن نتایج کالیبراسیون دبی‌سنج، تا دبی بیشتری افزایش یابد ولی از طرفی به خاطر اختلاف دمای پایین‌تر میزان خطای محاسبه شده، افزایش می‌یابد.

مسئله دیگری که می‌توان به آن اشاره نمود این است که ممکن است روند نمودار به همین شکل غیرخطی قابل استفاده باشد و باید کالیبراسیون را مطابق رابطه غیرخطی حاصل از نمودار به دست آورد. ماریان لازار در سال ۲۰۱۱ به طراحی دبی‌سنج حرارتی پرداخته است و در آن برای محاسبه دبی به معادله‌ای لگاریتمی رسیده است. [۲۸]

#### ۴-۷-عدم قطعیت دبی‌سنج

در محاسبه دبی مهم‌ترین پارامتری که منجر به عدم قطعیت می‌شود محاسبه دما می‌باشد. محاسبه عدم قطعیت به نوع حسگرها (ساخت حسگر)، نمایشگر دما (مدار الکترونیکی) و نحوه کالیبراسیون آن بستگی دارد. ما از حسگر pt100 برای دبی‌سنج استفاده نمودیم که میزان تلورانس آن در شکل ۴-۸ آمده است.

Temperature Resistance		Tolerance				Temperature Resistance		Tolerance			
(°C)	(Ω)	Class A (±°C) (±Ω)		Class B (±°C) (±Ω)		(°C)	(Ω)	Class A (±°C) (±Ω)		Class B (±°C) (±Ω)	
-200	18.52	0.55	0.24	1.3	0.56	500	280.98	1.15	0.38	2.8	0.93
-100	60.26	0.35	0.14	0.8	0.32	600	313.71	1.35	0.43	3.3	1.06
0	100.00	0.15	0.06	0.3	0.12	650	329.74	1.45	0.46	3.6	1.13
100	138.51	0.35	0.13	0.8	0.30	700	345.28	—	—	3.8	1.17
200	175.86	0.55	0.20	1.3	0.48	800	375.70	—	—	4.3	1.28
300	212.05	0.75	0.27	1.8	0.64	850	390.48	—	—	4.6	1.34
400	247.09	0.95	0.33	2.3	0.79						

شکل ۴-۸: تغییرات تلورانس محاسبه دما برای حسگر pt100 [۲۵]

در پژوهش حاضر از حسگر pt100 کلاس A استفاده شده است.

در گواهی کالیبراسیون که در ضمیمه آمده است مشخص است، عدم قطعیت دماسنجی که حسگرها را با آن کالیبره نمودیم  $\pm 0,15$  می‌باشد. از طرفی دیگر حسگرهایی که در این پروژه استفاده شده است از کلاس A می‌باشد که در بازه صفر تا ۱۰۰ درجه سانتی‌گراد به ترتیب ۰,۱۵ تا ۰,۳۵ درجه عدم قطعیت دارد. دما در محل قرارگیری حسگرها حدود ۵۰ درجه می‌باشد، در این صورت با توجه به

شکل ۴-۶ خطای ۰,۲۵ درجه‌ای می‌توان برای حسگر در نظر گرفت که برابر ۰,۵ درصد خطا در این بخش خواهد داشت.

در مدار الکترونیکی نیز محاسبه اختلاف دما با دقت ۰,۱ درصد خطا طراحی شده است.

یکی از وسایلی که می‌تواند در نتیجه تأثیرگذار باشد عدم قطعیت ناشی از بل پرور باشد که با توجه به کاتالوگ آن در شکل ۳-۱۳ آمده است برابر ۰,۲ درصد می‌باشد.

این دبی‌سنج مطابق قانون اول ترمودینامیک، دبی سیال عبوری را محاسبه می‌نماید. که این رابطه به صورت رابطه ۴-۴ است.

$$\dot{Q} = \dot{m} \cdot C \cdot \Delta T \quad (4-4)$$

که در این رابطه  $\dot{Q}$  شار حرارتی المنت و  $C$  ظرفیت گرمایی ویژه سیال می‌باشد و مطابق رابطه ۲-۱۰ عدم قطعیت برای دبی به صورت زیر محاسبه می‌شود.

$$\dot{m}_{total} = \sum_{i=0}^t \dot{m}_i \quad (5-4)$$

$$u^2(\dot{m}_{total}) = \sum_{i=0}^t u^2(\dot{m}_i) = \sum_{i=0}^t u^2\left(\frac{\dot{Q}}{C\Delta T}\right) \quad (6-4)$$

$$u^2(\dot{m}_{total}) = \sum_{i=0}^t \left( \frac{\partial \left( \frac{\dot{Q}}{C\Delta T} \right)}{\partial \dot{Q}} \right)^2 \cdot u^2(\dot{Q}) + \sum_{i=0}^t \left( \frac{\partial \left( \frac{\dot{Q}}{C\Delta T} \right)}{\partial C} \right)^2 \cdot u^2(C) + \sum_{i=0}^t \left( \frac{\partial \left( \frac{\dot{Q}}{C\Delta T} \right)}{\partial \Delta T} \right)^2 \cdot u^2(\Delta T)$$

$$u^2(\dot{m}_{total}) = \sum_{i=0}^t \left( \frac{1}{C\Delta T} \right)^2 \cdot u^2(\dot{Q}) + \sum_{i=0}^t \left( \frac{-\dot{Q}}{C^2\Delta T} \right)^2 \cdot u^2(C) + \sum_{i=0}^t \left( \frac{-\dot{Q}}{C\Delta T^2} \right)^2 \cdot u^2(\Delta T)$$

مطابق رابطه بالا می‌توان به عدم قطعیت دبی‌سنج دست یافت. می‌توان از عدم قطعیت ظرفیت گرمای ویژه صرف‌نظر کرد بنابراین رابطه عدم قطعیت به صورت رابطه ۷-۴ ساده می‌شود.

$$u^2(\dot{m}_{total}) = \sum_{i=0}^t \left( \frac{1}{C\Delta T} \right)^2 \cdot u^2(\dot{Q}) + \sum_{i=0}^t \left( \frac{-\dot{Q}}{C\Delta T^2} \right)^2 \cdot u^2(\Delta T) \quad (7-4)$$

از رابطه ۷-۴ می‌توان برای محاسبه عدم قطعیت استفاده نمود. برای کمی‌سازی معادله بالا نیاز به تجهیزات و برنامه‌نویسی مجزایی است، بنابراین کمی‌سازی این رابطه به‌عنوان پیشنهاد کار آینده می‌توان در نظر گرفت.



## فصل پنجم: نتیجه گیری

## ۵-۱- نتیجه گیری

در این پژوهش، بر مبنای ملاحظات مطرح شده، یک نمونه دبی سنج جرمی حرارتی لوله مویی با هدف به کارگیری در مصارف خانگی طراحی و ساخته شد. پس از ساخت، دبی سنج در آزمایش‌های گوناگون مورد ارزیابی قرار گرفته که خلاصه نتایج آن به شرح زیر است:

- ضریب کالیبراسیون دبی سنج ساخته شده برابر با ۰,۰۸ می‌باشد.
- دبی سنج ساخته شده در کاربردهایی با دبی پایین تا ۱,۲ متر مکعب بر ساعت قابل بکارگیری است.
- حساسیت پذیری دبی سنج نسبت به اختلاف دمای ایجاد شده با کاهش دبی افزایش می‌یابد.
- به منظور افزایش محدوده عملکردی دبی سنج، می‌توان از حسگر دما با حساسیت بالاتر، لوله حسگر با قطر کمتر و همچنین ضریب انتقال حرارت رسانشی بیشتر استفاده نمود.
- دقت اندازه‌گیری دبی سنج با افزایش سرعت پاسخ‌گویی و دقت حسگر دما قابل ارتقا می‌باشد.

## ۵-۲- پیشنهادهای کار آینده

برای بهبود نتایج دستگاه و یا برای تغییرات در ساخت آن می‌توان پیشنهادهای زیر را لحاظ نمود:

- تغییر جنس لوله‌ی حسگر به پلاتین برای سرعت انتقال حرارت بیشتر تا هم زمان پاسخ‌گویی کوتاه‌تر شود و هم در دبی بالا مشکل کمتری مشاهده شود.
- درزمینه‌ی طراحی المنت بررسی‌های بیشتری انجام شود که بتوان شرایط مختلفی را روی دستگاه اعمال نمود.
- برای کوچک‌تر شدن و بهتر شدن مدار الکترونیکی می‌توان از مدار ARM به جای AVR استفاده کرد، البته برای کار پژوهشی مدار AVR پاسخگوی کار می‌باشد.
- می‌توان برای بخش آرام‌ساز دبی سنج از ناحیه متخلخل به جای دسته لوله استفاده نمود.

- برای بهتر حس کردن حسگرها باید نحوه اتصال بهتر طراحی نمود که حسگر از تمام جهات دمای سطح لوله را حس نماید.
- از دماسنج دقیق تر برای کالیبره کردن حسگرها استفاده شود.
- بررسی مقادیر کمی برای محاسبه عدم قطعیت دبی می تواند به عنوان کار پژوهشی در نظر گرفت.
- بررسی این مسئله که آیا روند تغییرات دما در کالیبراسیون به طور کامل خطی می باشد یا ممکن است به صورت غیرخطی استفاده شود.



# پیوست

## پيوسٽ ۱\_ ڪڍ مدار الڪٽرونيڪي

/\*\*\*\*\*\*

Project: 0.1% precision Thermometer  
Version: 2.4.0  
Date: 2016-05-25  
Author: Mahdi Toori  
Company: eeResana 2016

Chip type: ATmega16A  
Program type: Application  
AVR Core Clock frequency: 8.000000 MHz  
Memory model: Small  
External RAM size: 0  
Data Stack size: 256

\*\*\*\*\*/

```
#include <mega16a.h>
#include <alcd.h>
#include <delay.h>
#include <stdio.h>
#include <spi.h>
#include <eeprom.h>
```

```
#define ADC_VREF_TYPE ((0<<REFS1) | (1<<REFS0) | (1<<ADLAR))
```

```
#define NOTHING 0
#define LEFT 1
#define RIGHT 2
#define DOWN 3
#define UP 4
#define OK 5
#define MAX_BUFF 50
```

```
unsigned char ml1=1, ml2=0, ml3=0;
unsigned char keyboard_output=NOTHING, left=0, right=0, down=0, up=0, ok=0,
buff_counter=0;
float flow_rate=0, abs_temp=0, diff_temp=0;
float adc_out, spi_out;
float single_point_input1, single_point_input2;
float diff_point_input1, diff_point_input2;
int spi_data[MAX_BUFF];
unsigned char adc_data[MAX_BUFF];
```

```
float EEMEM diff_r = 1, abs_r=1/(60.53295*2), diff_a=0, abs_a=0,diff_point1 = 0,
diff_point2= 60, single_point1 = 0, single_point2 = 90, flow_rate_const=0.4;
unsigned char EEMEM heater_power = 50, heater_threshold = 90;
```

```

void save_data()
{
  eeprom_write_float(0, diff_r);
  eeprom_write_float(4, abs_r);
  eeprom_write_float(8, diff_a);
  eeprom_write_float(12, abs_a);
  eeprom_write_float(16, diff_point1);
  eeprom_write_float(20, diff_point2);
  eeprom_write_float(24, single_point1);
  eeprom_write_float(28, single_point2);
  eeprom_write_float(32, flow_rate_const);
  eeprom_write_byte (36, heater_power);
  eeprom_write_byte (40, heater_threshold);
}

```

```

void load_data()
{
  lcd_gotoxy(0,1);
  lcd_puts("load_data...");
  diff_r = eeprom_read_float(0);
  abs_r = eeprom_read_float(4);
  diff_a = eeprom_read_float(8);
  abs_a = eeprom_read_float(12);
  diff_point1 = eeprom_read_float(16);
  diff_point2 = eeprom_read_float(20);
  single_point1 = eeprom_read_float(24);
  single_point2 = eeprom_read_float(28);
  flow_rate_const = eeprom_read_float(32);
  heater_power = eeprom_read_byte (36);
  heater_threshold = eeprom_read_byte (40);
}

```

```

void factory_reset()
{
  lcd_gotoxy(0,1);
  lcd_puts("factory reset...");
  eeprom_write_float(0, -0.0082414626);
  eeprom_write_float(4, -4.252);
  eeprom_write_float(8, 0);
  eeprom_write_float(12, 821.233);
  eeprom_write_float(16, 0);
  eeprom_write_float(20, 100);
  eeprom_write_float(24, 0);
  eeprom_write_float(28, 100);
  eeprom_write_float(32, 0.4);
  eeprom_write_byte (36, 50);
  eeprom_write_byte (40, 90);
}

```

```

unsigned char read_adc(unsigned char adc_input)
{
    ADMUX=adc_input | ADC_VREF_TYPE;
    delay_us(10);
    ADCSRA|=(1<<ADSC);
    while ((ADCSRA & (1<<ADIF))==0);
    ADCSRA|=(1<<ADIF);
    return ADCH;
}

char *ftoa(char *buffer, float d, int precision) {

    int wholePart = (int) d;

    // Deposit the whole part of the number.

    sprintf(buffer,"%d",wholePart);

    // Now work on the fraction if we need one.

    if (precision > 0) {

// We do, so locate the end of the string and insert
// a decimal point.

        char *endOfString = buffer;
        float fraction;
        while (*endOfString!='\0') endOfString++;
        *endOfString++ = '.';

// Now work on the fraction, be sure to turn any negative
// values positive.

        if (d < 0) {
            d *= -1;
            wholePart *= -1;
        }

        fraction = d - wholePart;
        while (precision > 0) {

// Multipleby ten and pull out the digit.

            fraction *= 10;
            wholePart = (long) fraction;
            *endOfString++ = '0' + wholePart;

// Update the fraction and move on to the
// next digit.

```



```

fraction -= wholePart;
precision--;
}

// Terminate the string.

*endOfString = '\0';
}

return buffer;
}

unsigned char read_keyboard_buffered()
{
    if(PIND.4 == 0)
    {
        if(left <255) left ++;
        if(right>0) right--;
        if(down >0) down --;
        if(up >0) up--;
        if(ok >0) ok--;
    }
    else if(PIND.3 == 0)
    {
        if(left >0) left --;
        if(right<255) right++;
        if(down >0) down --;
        if(up >0) up--;
        if(ok >0) ok--;
    }
    else if(PIND.2 == 0)
    {
        if(left >0) left --;
        if(right>0) right--;
        if(down <255) down ++;
        if(up >0) up--;
        if(ok >0) ok--;
    }
    else if(PIND.1 == 0)
    {
        if(left >0) left --;
        if(right>0) right--;
        if(down >0) down --;
        if(up <255) up ++;
        if(ok >0) ok--;
    }
    else if(PIND.0 == 0)
    {
        if(left >0) left --;

```

```

if(right>0) right--;
if(down >0) down --;
if(up >0) up--;
if(ok <255) ok ++;
    }
    else
    {
if(left >0) left --;
if(right>0) right--;
if(down >0) down --;
if(up >0) up--;
if(ok >0) ok--;
    }
    if(keyboard_output == NOTHING)
    {
if(left == 255)
keyboard_output = LEFT;
else if(right == 255)
keyboard_output = RIGHT;
else if(down == 255)
keyboard_output = DOWN;
else if(up == 255)
keyboard_output = UP;
else if(ok == 255)
keyboard_output = OK;
    }
    else if((left == 0) && (right == 0) && (down == 0) && (up == 0) && (ok ==
0))
keyboard_output = NOTHING;
return keyboard_output;
}

unsigned char read_keyboard()
{
    if(PIND.4 == 0)
    {
if (keyboard_output!= LEFT)
{
keyboard_output = LEFT;
return LEFT;
}
else
return NOTHING;
    }
    else if(PIND.3 == 0)
    {
if (keyboard_output!= RIGHT)
{
keyboard_output = RIGHT;

```

```

return RIGHT;
}
else
return NOTHING;
    }
    else if(PIND.2 == 0)
    {
if (keyboard_output!= DOWN)
{
keyboard_output = DOWN;
return DOWN;
}
else
return NOTHING;
    }
    else if(PIND.1 == 0)
    {
if (keyboard_output!= UP)
{
keyboard_output = UP;
return UP;
}
else
return NOTHING;
    }
    else if(PIND.0 == 0)
    {
if (keyboard_output!= OK)
{
keyboard_output = OK;
return OK;
}
else
return NOTHING;
    }
    else
    {
keyboard_output = NOTHING;
return NOTHING;
}
}

void set_heater()
{
    if (abs_temp < (float)heater_threshold)
OCR0 = (char)(heater_power*2.55);
else
OCR0 = 0;
}

```

```

void get_inputs()
{
    unsigned char i;
    unsigned int spi_raw;
    float adc_sum=0, spi_sum=0;
    adc_data[buff_counter]= read_adc(0)/2 + read_adc(1)/2;
    while((PINB.2));
    spi(0x39);
    while(!(PINB.2));
    while((PINB.2));
    spi_raw =(spi(0)<<8); //read MSB frist
    spi_raw |=spi(0); //read LSB and combine with MSB
    spi_data[buff_counter] = spi_raw - 0x8000;
    for(i = 0; i<MAX_BUFF; i++)
    {
        adc_sum += ((float)adc_data[i]*10.0)/MAX_BUFF;
        spi_sum += ((float)spi_data[i]*1.0)/MAX_BUFF;
    }
    adc_out = adc_sum/10.0; //MAX_BUFF;
    spi_out = spi_sum; //MAX_BUFF;

    abs_temp = abs_r*adc_out + abs_a;
    diff_temp = diff_r*spi_out + diff_a;
    flow_rate = diff_temp*flow_rate_const;
    buff_counter = (buff_counter+1)%MAX_BUFF;
}

void differential_calibrate()
{
    diff_r = (diff_point2 - diff_point1)/(diff_point_input2 - diff_point_input1);
    diff_a = diff_point2 - diff_r*diff_point_input2;
    eeprom_write_float(0, diff_r);
    eeprom_write_float(8, diff_a);
    eeprom_write_float(16, diff_point1);
    eeprom_write_float(20, diff_point2);
}

void zero_calibrate()
{
    diff_a = diff_a - diff_temp;
    eeprom_write_float(8, diff_a);
}

void single_calibrate()
{
    abs_r = (single_point2 - single_point1)/(single_point_input2 -
single_point_input1);
    abs_a = single_point2 - abs_r*single_point_input2;
}

```

```

        eeprom_write_float(4, abs_r);
        eeprom_write_float(12, abs_a);
        eeprom_write_float(24, single_point1);
eeprom_write_float(28, single_point2);
}

void update_lcd()
{
    unsigned char kbd = read_keyboard(), str1[20],str2[20];
    if(ml1 == 1)
    {
        sprintf(str1,"Temp. Diff.");
        ftoa(str2,diff_temp,2);
        if(kbd == RIGHT)
            ml1=2;
    }
    else if(ml1 == 2)
    {
        sprintf(str1,"Flow Rate");
        ftoa(str2,flow_rate,2);
        if(kbd == RIGHT)
            ml1=3;
        else if(kbd == LEFT)
            ml1=1;
    }
    else if(ml1 == 3)
    {
        sprintf(str1,"Absolute Temp.");
        ftoa(str2,abs_temp,2);
        if(kbd == RIGHT)
            ml1=4;
        else if(kbd == LEFT)
            ml1=2;
    }
    else if(ml1 == 4)
    {
        if(ml2==0)
        {
            sprintf(str1,"Calibration");
            sprintf(str2," ");
            if(kbd == OK)
                ml2=1;
            else if(kbd == RIGHT)
                ml1=5;
            else if(kbd == LEFT)
                ml1=3;
        }
        else if(ml2 == 1)
        {

```

```

sprintf(str1,"Zero");
sprintf(str2,"Calibration");
if(kbd == OK)
{
zero_calibrate();
ml2=0;
}
else if(kbd == RIGHT)
ml2=2;
}
else if(ml2 == 2)
{
if(ml3==0)
{
sprintf(str1,"Differential");
sprintf(str2,"Calibration");
if(kbd == OK)
ml3=1;
else if(kbd == RIGHT)
ml2=3;
else if(kbd == LEFT)
ml2=1;
else if(kbd == DOWN || kbd == UP)
ml2=0;
}
else if (ml3 == 1)
{
sprintf(str1,"Point 1");
ftoa(str2,diff_point1,1);
if(kbd == OK)
{
diff_point_input1 = spi_out;
ml3=2;
}
else if(kbd == UP)
{
if (diff_point1 < 120)
diff_point1 = diff_point1 + 0.1;
}
else if(kbd == DOWN)
{
if (diff_point1 > 0)
diff_point1 = diff_point1 - 0.1;
}
else if(kbd == RIGHT || kbd == LEFT)
{
ml3 = 0;
}
}
}
}

```

```

else if (ml3 == 2)
{
sprintf(str1,"Point 2");
ftoa(str2,diff_point2,1);
if(kbd == OK)
{
diff_point_input2 = spi_out;
differential_calibrate();
ml3=0;
}
else if(kbd == UP)
{
if (diff_point2 < 120)
diff_point2 = diff_point2 + 0.1;
}
else if(kbd == DOWN)
{
if (diff_point2 > 0)
diff_point2 = diff_point2 - 0.1;
}
else if(kbd == RIGHT || kbd == LEFT)
{
ml3 = 0;
}
}
}
else if(ml2 == 3)
{
if(ml3==0)
{
sprintf(str1,"Single");
sprintf(str2,"Calibration");
if(kbd == OK)
ml3=1;
else if(kbd == LEFT)
ml2=2;
else if(kbd == DOWN || kbd == UP)
ml2=0;
}
else if (ml3 == 1)
{
sprintf(str1,"Point 1");
ftoa(str2,single_point1,1);
if(kbd == OK)
{
single_point_input1 = adc_out;
ml3=2;
}
else if(kbd == UP)

```

```

{
if (single_point1 < 120)
single_point1 = single_point1 + 0.1;
}
else if(kbd == DOWN)
{
if (single_point1 > 0)
single_point1 = single_point1 - 0.1;
}
else if(kbd == RIGHT || kbd == LEFT)
{
ml3 = 0;
}
}
else if (ml3 == 2)
{
sprintf(str1,"Point 2");
ftoa(str2,single_point2,1);
if(kbd == OK)
{
single_point_input2 = adc_out;
single_calibrate();
ml3=0;
}
else if(kbd == UP)
{
if (single_point2 < 120)
single_point2 = single_point2 + 0.1;
}
else if(kbd == DOWN)
{
if (single_point2 > 0)
single_point2 = single_point2 - 0.1;
}
else if(kbd == RIGHT || kbd == LEFT)
{
ml3 = 0;
}
}
}
}
else if(ml1 == 5)
{
if(ml2==0)
{
sprintf(str1,"Setting");
sprintf(str2," ");
if(kbd == OK)
ml2=1;
}
}
}

```



```

else if(kbd == LEFT)
ml1=4;
else if(kbd == RIGHT)
ml1=6;
}
else if(ml2==1)
{
sprintf(str1,"Flow rate Const");
ftoa(str2,flow_rate_const,2);
if(kbd == OK)
{
eeprom_write_float(32, flow_rate_const);
eeprom_write_byte (36, heater_power);
eeprom_write_byte (40, heater_threshold);
ml2=0;
}
else if(kbd == UP)
{
if (flow_rate_const < 2)
flow_rate_const = flow_rate_const + 0.01;
}
else if(kbd == DOWN)
{
if (flow_rate_const > 0)
flow_rate_const = flow_rate_const - 0.01;
}
else if(kbd == RIGHT)
{
ml2 = 2;
}
}
else if(ml2==2)
{
sprintf(str1,"Heater Threshold");
sprintf(str2,"%d",heater_threshold);
if(kbd == OK)
{
eeprom_write_float(32, flow_rate_const);
eeprom_write_byte (36, heater_power);
eeprom_write_byte (40, heater_threshold);
ml2=0;
}
else if(kbd == UP)
{
if (heater_threshold < 120)
heater_threshold = heater_threshold + 1;
}
else if(kbd == DOWN)
{

```

```

if (heater_threshold > 0)
heater_threshold = heater_threshold - 1;
}
else if(kbd == RIGHT)
{
ml2 = 3;
}
else if(kbd == LEFT)
{
ml2 = 1;
}
}
else if(ml2==3)
{
sprintf(str1,"Heater Power");
sprintf(str2,"%d",heater_power);
if(kbd == OK)
{
eeprom_write_float(32, flow_rate_const);
eeprom_write_byte (36, heater_power);
eeprom_write_byte (40, heater_threshold);
ml2=0;
}
else if(kbd == UP)
{
if (heater_power < 100)
heater_power = heater_power + 1;
}
else if(kbd == DOWN)
{
if (heater_power > 0)
heater_power = heater_power - 1;
}
else if(kbd == RIGHT)
{
ml2 = 4;
}
else if(kbd == LEFT)
{
ml2 = 2;
}
}
else if(ml2==4)
{
sprintf(str1,"Factory Reset");
sprintf(str2," ");
if(kbd == OK)
{
factory_reset();
}
}

```

```

ml2=0;
}
else if(kbd == LEFT)
{
ml2 = 3;
}
}
    }/**/
    else if(ml1 == 6)
    {
if(ml2==0)
{
sprintf(str1,"Constants");
sprintf(str2," ");
if(kbd == OK)
ml2=1;
else if(kbd == LEFT)
ml1=5;
}
else if(ml2==1)
{
sprintf(str1,"diff_r,%04x",diff_r);
ftoa(str2,diff_r,8);
if(kbd == OK)
{
ml2=0;
}
else if(kbd == RIGHT)
{
ml2 = 2;
}
}
else if(ml2==2)
{
sprintf(str1,"abs_r,%04x",abs_r);
ftoa(str2,abs_r,8);
if(kbd == OK)
{
ml2=0;
}
else if(kbd == RIGHT)
{
ml2 = 3;
}
}
else if(kbd == LEFT)
{
ml2 = 1;
}
}
}

```

```

else if(ml2==3)
{
sprintf(str1,"diff_a,%04x",diff_a);
ftoa(str2,diff_a,8);
if(kbd == OK)
{
ml2=0;
}
else if(kbd == RIGHT)
{
ml2 = 4;
}
else if(kbd == LEFT)
{
ml2 = 2;
}
}
else if(ml2==4)
{
sprintf(str1,"abs_a,%04x",abs_a);
ftoa(str2,abs_a,8);
if(kbd == OK)
{
ml2=0;
}
else if(kbd == RIGHT)
{
ml2 = 5;
}
else if(kbd == LEFT)
{
ml2 = 3;
}
}
else if(ml2==5)
{
sprintf(str1,"diff_point1%04x",diff_point1);
ftoa(str2,diff_point1,8);
if(kbd == OK)
{
ml2=0;
}
else if(kbd == RIGHT)
{
ml2 = 6;
}
else if(kbd == LEFT)
{
ml2 = 4;
}
}

```

```

}
}
else if(ml2==6)
{
printf(str1,"diff_point2%04x",diff_point2);
ftoa(str2,diff_point2,8);
if(kbd == OK)
{
ml2=0;
}
else if(kbd == RIGHT)
{
ml2 = 7;
}
else if(kbd == LEFT)
{
ml2 = 5;
}
}
else if(ml2==7)
{
printf(str1,"sin_point1 %04x",single_point1);
ftoa(str2,single_point1,8);
if(kbd == OK)
{
ml2=0;
}
else if(kbd == RIGHT)
{
ml2 = 8;
}
else if(kbd == LEFT)
{
ml2 = 6;
}
}
else if(ml2==8)
{
printf(str1,"sin_point2 %04x",single_point2);
ftoa(str2,single_point2,8);
if(kbd == OK)
{
ml2=0;
}
else if(kbd == RIGHT)
{
ml2 = 9;
}
else if(kbd == LEFT)

```

```

{
ml2 = 7;
}
}
else if(ml2==9)
{
sprintf(str1,"flow_const %04x",flow_rate_const);
ftoa(str2,flow_rate_const,8);
if(kbd == OK)
{
ml2=0;
}
else if(kbd == RIGHT)
{
ml2 = 10;
}
else if(kbd == LEFT)
{
ml2 = 8;
}
}
else if(ml2==10)
{
sprintf(str1,"heater_pwr %04x",heater_power);
sprintf(str2,"%d",heater_power);
if(kbd == OK)
{
ml2=0;
}
else if(kbd == RIGHT)
{
ml2 = 11;
}
else if(kbd == LEFT)
{
ml2 = 9;
}
}
else if(ml2==11)
{
sprintf(str1,"heater_thrs%04x",heater_threshold);
sprintf(str2,"%d",heater_threshold);
if(kbd == OK)
{
ml2=0;
}
else if(kbd == LEFT)
{
ml2 = 10;
}
}

```

```

}
}
}/**/
lcd_clear();
lcd_gotoxy(0,0);
lcd_puts(str1);
lcd_gotoxy(0,1);
lcd_puts(str2);
}

void initialize()
{
    DDRA=(0<<DDA7) | (0<<DDA6) | (0<<DDA5) | (0<<DDA4) | (0<<DDA3) |
(0<<DDA2) | (0<<DDA1) | (0<<DDA0);
    PORTA=(0<<PORTA7) | (0<<PORTA6) | (0<<PORTA5) | (0<<PORTA4) |
(0<<PORTA3) | (0<<PORTA2) | (0<<PORTA1) | (0<<PORTA0);
    DDRB=(1<<DDB7) | (0<<DDB6) | (1<<DDB5) | (1<<DDB4) | (1<<DDB3) |
(0<<DDB2) | (0<<DDB1) | (0<<DDB0);
    PORTB=(1<<PORTB7) | (0<<PORTB6) | (1<<PORTB5) | (1<<PORTB4) |
(1<<PORTB3) | (0<<PORTB2) | (1<<PORTB1) | (1<<PORTB0);
    DDRC=(1<<DDC7) | (1<<DDC6) | (1<<DDC5) | (1<<DDC4) | (1<<DDC3) |
(1<<DDC2) | (1<<DDC1) | (1<<DDC0);
    PORTC=(0<<PORTC7) | (0<<PORTC6) | (0<<PORTC5) | (0<<PORTC4) |
(0<<PORTC3) | (0<<PORTC2) | (0<<PORTC1) | (0<<PORTC0);
    DDRD=(0<<DDD7) | (0<<DDD6) | (0<<DDD5) | (0<<DDD4) | (0<<DDD3) |
(0<<DDD2) | (0<<DDD1) | (0<<DDD0);
    PORTD=(1<<PORTD7) | (1<<PORTD6) | (1<<PORTD5) | (1<<PORTD4) |
(1<<PORTD3) | (1<<PORTD2) | (1<<PORTD1) | (1<<PORTD0);

// Timer/Counter 0 initialization
// Clock source: System Clock
// Clock value: 125.000 kHz
// Mode: Fast PWM top=0xFF
// OC0 output: Non-Inverted PWM
// Timer Period: 2.048 ms
// Output Pulse(s):
// OC0 Period: 2.048 ms Width: 0 us
    TCCR0=(1<<WGM00) | (1<<COM01) | (0<<COM00) | (1<<WGM01) | (0<<CS02) |
(1<<CS01) | (1<<CS00);
    TCNT0=0x00;
    OCR0=0;
// TCCR0=(0<<WGM00) | (0<<COM01) | (0<<COM00) | (0<<WGM01) | (0<<CS02) |
(0<<CS01) | (0<<CS00);
//TCNT0=0x00;
//OCR0=0x00;

// SPI initialization
// SPI Type: Master
// SPI Clock Rate: 1000.000 kHz

```

```

// SPI Clock Phase: Cycle Start
// SPI Clock Polarity: High
// SPI Data Order: MSB First
SPCR=0x5D;
SPSR=0x00;

TCCR1A=(0<<COM1A1) | (0<<COM1A0) | (0<<COM1B1) | (0<<COM1B0) |
(0<<WGM11) | (0<<WGM10);
TCCR1B=(0<<ICNC1) | (0<<ICES1) | (0<<WGM13) | (0<<WGM12) |
(0<<CS12) | (0<<CS11) | (0<<CS10);
TCNT1H=0x00;
TCNT1L=0x00;
ICR1H=0x00;
ICR1L=0x00;
OCR1AH=0x00;
OCR1AL=0x00;
OCR1BH=0x00;
OCR1BL=0x00;
ASSR=0<<AS2;
TCCR2=(0<<PWM2) | (0<<COM21) | (0<<COM20) | (0<<CTC2) | (0<<CS22)
| (0<<CS21) | (0<<CS20);
TCNT2=0x00;
OCR2=0x00;
TIMSK=(0<<OCIE2) | (0<<TOIE2) | (0<<TICIE1) | (0<<OCIE1A) |
(0<<OCIE1B) | (0<<TOIE1) | (0<<OCIE0) | (0<<TOIE0);
MCUCR=(0<<ISC11) | (0<<ISC10) | (0<<ISC01) | (0<<ISC00);
MCUCSR=(0<<ISC2);
UCSRB=(0<<RXCIE) | (0<<TXCIE) | (0<<UDRIE) | (0<<RXEN) |
(0<<TXEN) | (0<<UCSZ2) | (0<<RXB8) | (0<<TXB8);
ACSR=(1<<ACD) | (0<<ACBG) | (0<<ACO) | (0<<ACI) | (0<<ACIE) |
(0<<ACIC) | (0<<ACIS1) | (0<<ACIS0);
SFIOR=(0<<ACME);
ADMUX=ADC_VREF_TYPE;
ADCSRA=(1<<ADEN) | (0<<ADSC) | (0<<ADATE) | (0<<ADIF) |
(0<<ADIE) | (1<<ADPS2) | (1<<ADPS1) | (0<<ADPS0);
SFIOR=(0<<ADTS2) | (0<<ADTS1) | (0<<ADTS0);
TWCR=(0<<TWEA) | (0<<TWSTA) | (0<<TWSTO) | (0<<TWEN) |
(0<<TWIE);
lcd_init(16);
lcd_clear();
lcd_gotoxy(0,0);
lcd_puts("Initializing...");




if((eeprom_read_byte(36) == 0xff) || (eeprom_read_byte(40) == 0xff))
factory_reset();
else
load_data();
spi(0x10);
delay_ms(10);

```



```
        spi(0x62);
        delay_ms(1000);
    }
void main(void)
{
char i = 0;
initialize();
while (1)
{
get_inputs();
set_heater();
update_lcd();
delay_ms(10);
}
}
```

پیوست ۲ - تصویر گواهی کالیبراسیون دماسنج مرجع و نمایشگر آن

Certificate Of Calibration Sanjesh Gostar Kaveh Reference Calibration LAB		آزمایشگاه مرجع کالیبراسیون سنجش گستر کاوه گواهی کالیبراسیون	
 Sam building, NO 3, Pirzadeh alley, Nesa AVE Mirdamad Blvd, Tehran, Iran Tel: +98 21 22 90 94 55 Fax: +98 21 22 91 29 81 Web Site: www.sgk-ir.com E-mail: info@sgk-ir.com		 NACI سازمان ملی استاندارد ایران ISO NACI 17025 NO.150	
Certificate Number: 9505438001	Date of calibration: 95/04/15	Page 1 of 2	
Date of Issue: 95/04/20	Recommended Recalibration date: 96/04/15		
<b>Customer &amp; Equipment Specifications:</b>		<b>مشخصات متقاضی و تجهیز:</b>	
Customer name: Abzar Daghigh Vista Co.	نام متقاضی: شرکت ابزار دقیق ویستا		
Address: Tehran	آدرس: تهران		
Instrument name: Resistance Thermometer with indicator	نام دستگاه: ترمومتر مقاومتی به همراه نشاندهنده		
Settlement place: .....	محل استقرار: .....		
Model: TE8-RB10W	مدل: TE8-RB10W		
Manufactured: TOKY	سازنده: TOKY		
ID: SG-PT-01	علامت مشخصه: SG-PT-01		
Serial number: .....	شماره سریال: .....		
Resolution: 0.1 °C	رنده بندی: 0.1 °C		
<b>Calibration Condition:</b>		<b>شرایط کالیبراسیون:</b>	
<b>Reference Standards:</b>			
<ul style="list-style-type: none"> <li>• Dual Dry block &amp; liquid bath Calibrator - Model: Hyperion- Complete traceable to UKAS</li> <li>• Temperature data logger Model: PT104 Accuracy: 0.01°C traceable to UKAS</li> <li>• WRT08: semi standard platinum resistance thermometer traceable to UKAS</li> </ul>			
<b>Traceability :</b>			
The Reference Standards are traceably calibrated to national and international metrology institute.			
All References are calibrated by calibration standards: SPRT : S/N : 909H/159 (Cert No:15-02-51 ) & Standard Thermocouple :S/N: 1107PRBK (Cert NO: 10691) & Water tripple point : S/N: 88-30-1037 (Cert No:131638)			
Ambient Condition:	Temperature: 24±2 °C	Humidity: 45 ± 15 %RH	
Range Of Calibration:	0 to 100 °C		
Calibration Procedure:	Comparison: Due to Standards (DKD-R 5-1 & ISIRI 6795)		
Uncertainty:	The reported expanded uncertainty is based on a standard uncertainty multiplied by the Coverage factor k=2, providing a level of confidence of approximately 95%.		
The uncertainty evaluation has been carried out in accordance with EAL publication(EA4/02)requirements.			
مهر آزمایشگاه:		مسئول آزمایشگاه:	
			
Form No:SGF51001			
* پیشنهاد می گردد استفاده کننده در فواصل زمانی معین نسبت به کالیبراسیون مجدد اقدام نماید. * هر گونه نسخه برداری از این گواهی باید به صورت کامل و از کلیه صفحات باشد. * این گواهی بدون مهر آزمایشگاه صادر کننده فاقد اعتبار می باشد.			

**Certificate Of Calibration**  
**Sanjesh Gostar Kaveh**  
 Reference Calibration LAB

آزمایشگاه مرجع کالیبراسیون سنجش گستر کاوه  
 گواهی کالیبراسیون



Sam building, NO 3, Pirzadeh alley, Nesa AVE,  
 Mirdamad Blvd, Tehran, Iran  
 Tel: +98 21 22 90 94 55  
 Fax: +98 21 22 91 29 81  
 Web Site: www.sgk-ir.com  
 E-mail: info@sgk-ir.com



Page: 2 of 2

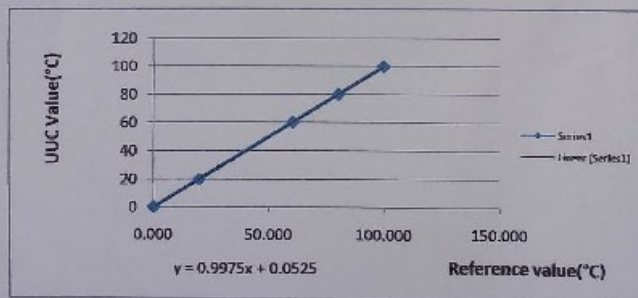
Certificate Number: 9505438001 Date of calibration: 95/04/15  
 Date of issue: 95/04/20 Recommended Recalibration date: 96/04/15

**Calibration Results:**

نتایج کالیبراسیون:

Test NO	Set Point (°C)	Reference (°C)	U.U.C (°C)	Error (°C)	Uncertainty (±°C)
1	0	0.141	0.3	0.159	0.15
2	20	19.817	19.7	-0.117	0.15
3	60	60.418	60.3	-0.118	0.15
4	80	80.254	80.1	-0.154	0.15
5	100	99.951	99.8	-0.151	0.15

Ice point check before calibration		Ice point check after calibration	
Reference (°C)	U.U.C (°C)	Reference (°C)	U.U.C (°C)
0.141	0.3	0.138	0.3



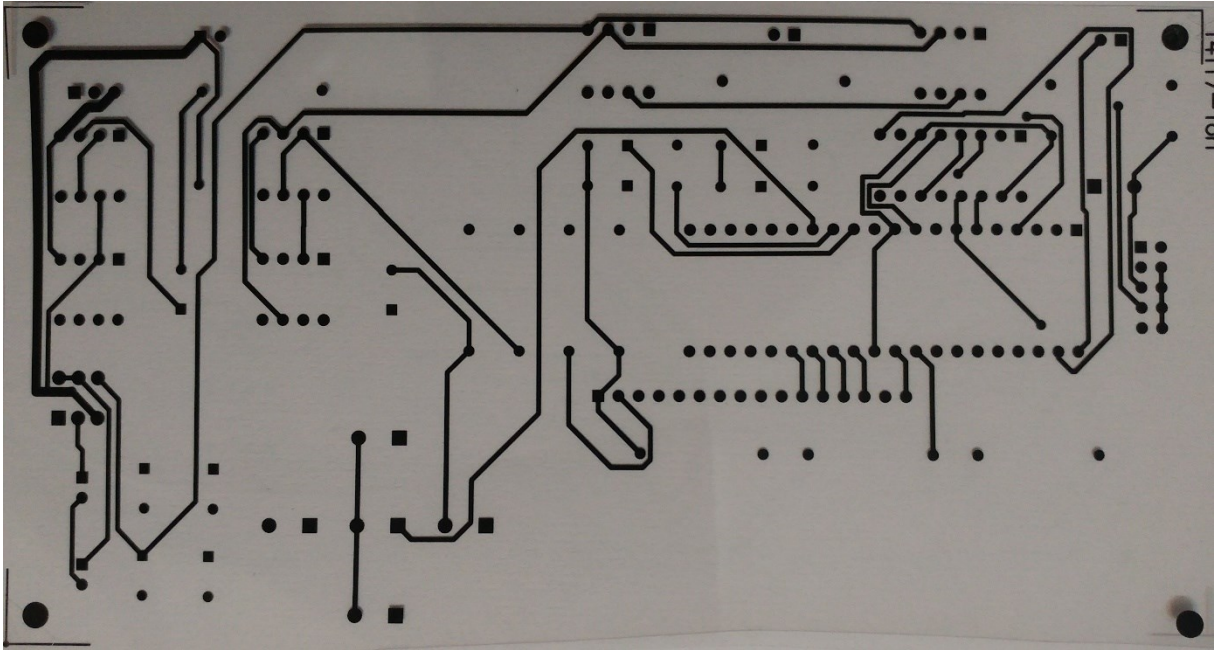
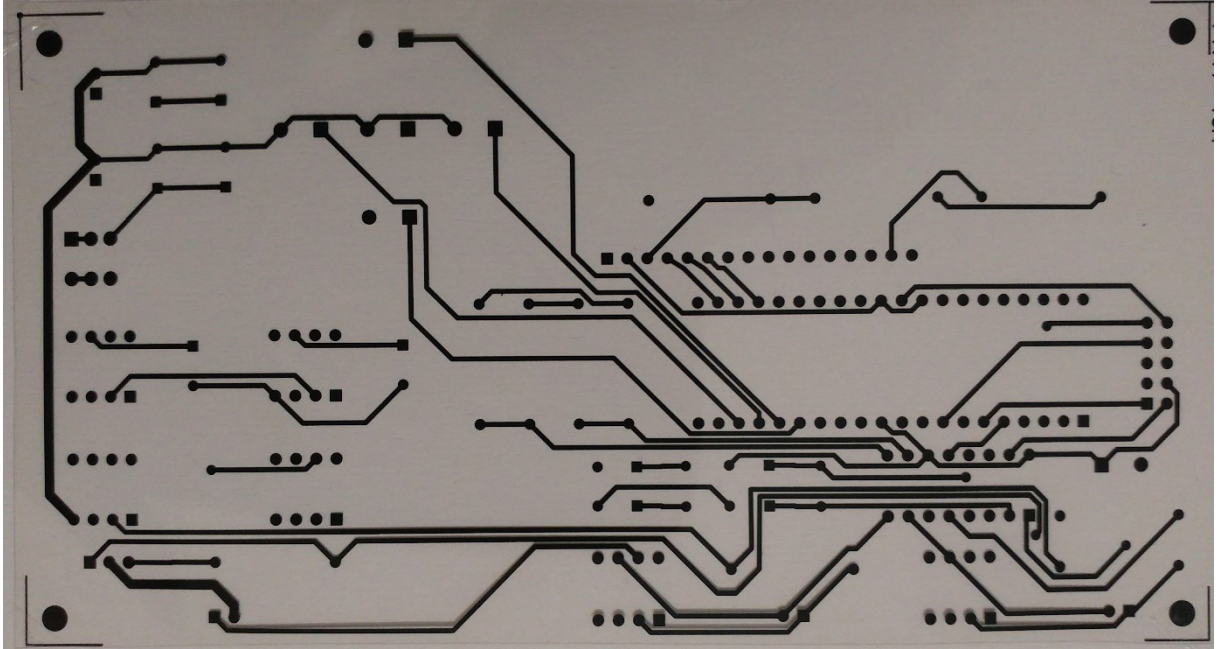
**Explanations:**

- U.U.C: Unit Under Calibration
- 3 Wire : PT 100
- Insulated junction

Form No:SGFS1002

- پیشنهاد می گردد استفاده کننده در فواصل زمانی معین نسبت به کالیبراسیون مجدد اقدام نماید
- هر گونه نسخه برداری از این گواهی باید به صورت کامل و از کلیه صفحات باشد
- این گواهی بدون مهر آزمایشگاه صادر کننده فاقد اعتبار می باشد

پیوست ۳\_ تصویر نقشه مدار الکترونیکی



## منابع

- [1] OP.chattopadhyey, "flowmeters and flow measurement."
- [2] والی. م. ح. "بررسی و تحقیق در طراحی و ساخت یک فلومتر کالریفیک برای متان," پایان نامه ارشد, دانشکده مکانیک, دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی ۱۳۹۱.
- [3] فرانک. ام. وایت, مکانیک سیالات. ۱۳۹۰.
- [4] M. Farzaneh-Gord, S. Parvizi, A. Arabkoohsar, L. Machado, and R. N. N. Koury, "Potential use of capillary tube thermal mass flow meters to measure residential natural gas consumption," *Journal of Natural Gas Science and Engineering*, vol. 22, pp. 540-550, 2015/01/01/ 2015.
- [5] <http://www.sierrainstruments.com/>.
- [6] R. P. Viswanath, B. Viswanathan, and M. V. C. Sastri, "Kinetics of reduction of Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> to Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub> by the constant temperature differential thermal analysis method," *Thermochimica Acta*, vol. 16, no. 2, pp. 240-244, 1976/08/01/ 1976.
- [7] P. Cappa, Z. Del Prete, and F. Marinozzi, "Experimental analysis of a new strain-gage signal conditioner based on a constant-current method," *Sensors and Actuators A: Physical*, vol. 55, no. 2, pp. 173-178, 1996/07/31/ 1996.
- [8] [http://www.scielo.br/scielo.php?script=sci\\_arttext&pid=S1678-58782004000400006](http://www.scielo.br/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1678-58782004000400006).
- [9] F. Cascetta, G. Rotondo, A. Piccato, and P. G. Spazzini, "Calibration procedures and uncertainty analysis for a thermal mass gas flowmeter of a new generation," *Measurement*, vol. 89, pp. 280-287, 2016/07/01/ 2016.
- [10] K. Komiya, F. Higuchi, and K. Ohtani, "Characteristics of a thermal gas flow meter," *Rev. Sci. Instrum.*, vol. 59, no. 3, p. 477\_479, 1988.
- [11] S. J. Kim and S. P. Jang, "Experimental and numerical analysis of heat transfer phenomena in a sensor tube of a mass flow controller," *International Journal of Heat and Mass Transfer*, vol. 44, no. 9, pp. 1711-1724, 2001/05/01/ 2001.
- [12] <http://www.iraniangas.ir/>.
- [13] A. S. Cubukcu, D. F. R. Romero, and G. A. Urban, "A dynamic thermal flow sensor for simultaneous measurement of thermal conductivity and flow velocity of gases," *Sensors and Actuators A: Physical*, vol. 208, pp. 73-87, 2014/02/01/ 2014.
- [14] G. Ficco, "Metrological performance of diaphragm gas meters in distribution networks," *Flow Measurement and Instrumentation*, vol. 37, pp. 65-72, 2014/06/01/ 2014.
- [15] E. L. Beronich, M. A. Abdi, and K. A. Hawboldt, "Prediction of natural gas behaviour in loading and unloading operations of marine CNG transportation systems," *Journal of Natural Gas Science and Engineering*, vol. 1, no. 1, pp. 31-38, 2009/07/01/ 2009.
- [16] L. D. Hinkle and C. F. Mariano, "Toward understanding the fundamental mechanisms and properties of the thermal mass flow controller," *J. Vac. Sci. Technol.* 9, p. 2043\_2047, 1991.
- [17] I. Y. Han, D.-K. Kim, and S. J. Kim, "Study on the transient characteristics of the sensor tube of a thermal mass flow meter," *International Journal of Heat and Mass Transfer*, vol. 48, no. 13, pp. 2583-2592, 2005/06/01/ 2005.
- [18] <http://www.instrumentationtoday.com/temperature-sensors/2011/08/>.
- [19] <http://www.seaward.co.uk/downloads/Guide%20to%20temperature%20measurement.pdf>.

- [20] M. Arlindo Amador de Matos and N. José Fernandes Rodrigues, "Gas mass-flow meters: Measurement and uncertainties," *Flow Measurement and Instrumentation*, vol. 33, pp. 45-54, 2013/10/01/ 2013.
- [21] [http://www.tuvnel.com/site2/download/the\\_calibration\\_of\\_flow\\_meters](http://www.tuvnel.com/site2/download/the_calibration_of_flow_meters).
- [22] G. Ficco, L. Celenza, M. Dell'Isola, A. Frattolillo, and P. Vigo, "Experimental evaluation of thermal mass smart meters influence factors," *Journal of Natural Gas Science and Engineering*, vol. 32, pp. 556-565, 2016/05/01/ 2016.
- [23] پرویزی. س. "طراحی دبی سنج جرمی حرارتی از نوع لوله موپین برای اندازه گیری دبی پایین گاز طبیعی و تحلیل آن با نرم افزار فلوننت," پایان نامه ارشد، دانشکده مکانیک، دانشگاه صنعتی شاهرود، ۱۳۹۳.
- [24] <https://www.sterlingsensors.co.uk/rtds>.
- [25] <https://www.jahankitshop.com/market/d/6169>.
- [26] <http://igs.nigc.ir/>.
- [27] <http://www.egc.ir>.
- [28] M. Lazar, "Desining low gas flow meters based on the calorimetric principle of flow rate measuring," *the hoholistic approach enviromentl*, 2011.





## Abstract

In all industries, national labs, university research centers, plants(factories) and all the units using flow meter, using a precise flow meter is inevitable and measurement is considered as a critical issue. One of the important applications of flow meters is household gas consumption to which a large portion of the over-all produced gas is allocated. Thus, to achieve this goal we thought of a new kind of flow meter, called capillary thermal mass flow meter for household consumption. The structure of this flow meter compared to the existing diaphragm flow meter is much simpler. In addition, fixed components, less periodic repair and higher precision are the other strong points of this device. This flow meter follows the first law of thermodynamics that consists of laminar flow element and a sensor tube with has central heater and two sensors are located upstream and downstream of the heater. In this way, using the thermal flux into the sensor tube to calculate the temperature difference and flow rate. Using 3.12 advanced code version AVR to calculate heat difference and via PT100 sensor is assigned on tube for sensing. Thus, we designed and built this type of flow meter according to the national gas standards with the use of the currently available elements in the market. Then in calibration units, we calibrated household gas counters. Finally, we analyzed the results, problems and obstacles we faced. Moreover, we came up with new equation to calculate the uncertainty of the flow meter. Calibration factor is derived 0.08 and the flow meter is suitable up to 1.2 cubic meter per hour.

Keywords: thermal mass flow meter, capillary tube, heat transfer, household gas, calibration, uncertainty.



**Shahrood University of Technology**  
**Department of Mechanical and Mechatronic Engineering**

**Design and manufacturing a typical domestic natural gas meter based on capillary  
Tube Thermal mass flow mete**

by

**Mohammad Ramezanpour Fomeshi**

**Supervisor**

**Prof. Farzaneh Gord**

**industrial advisor**

**saeed jamali livani**

**September 2017**