



به نام خدا

پردیس دانشکده‌های فنی دانشگاه تهران

دانشکده مهندسی مکانیک



# طراحی و ساخت حسگر خازنی سطح سنج آب در مخازن

پروژه تخصصی کارشناسی

رشته مهندسی مکانیک

نویسنده:

امیرمهدی متین ۸۱۰۶۹۵۳۰۰

استاد راهنما:

دکتر موسی آیتی

مرداد ۱۴۰۰

## تشکر

با تشکر از زحمات و راهنمایی‌های استاد گرانقدر، جناب آقای دکتر آیتی و همچنین مدیریت و کادر مخبر شرکت «سامانه پایش قدرت» که در راستای انجام این پروژه یاری رسانده‌اند.

## چکیده

تشخیص سطح مایعات مختلف در محیط‌های متنوع بصورت پیوسته همواره یک مساله پیچیده و بالهمتی بوده است. استفاده از مخازن با ارتفاع بالا و همچنین مایعات با جنس و خواص متفاوت، در صنایع سبک و سنگین بر این پیچیدگی افزوده است. در این پروژه، یک حسگر خازنی سطح‌سنچ آب در مخازن طراحی و پیاده‌سازی شده است. حسگرهای خازنی از جمله حسگرهای ازran و پرکاربرد در صنایع گوناگون می‌باشد. از کابل کواکسیال PVC به عنوان عنصر حساس حسگر استفاده شده است. در ابتدا پیکربندی‌های مختلف ساخت چنین حسگرهایی بررسی می‌شود. سپس مکانیزم و پیکربندی اندازه‌گیری انتخاب شده مورد تجزیه و تحلیل بطور دقیق قرار می‌گیرد. معادلات حاکم بر این پیکربندی‌ها آنالیز می‌شود. مدار الکترونیکی تبدیل ظرفیت خازن به ولتاژ و مدارات برآش سیگنال<sup>۱</sup> طراحی می‌شود. برد مدار چاپی<sup>۲</sup> طراحی و پیاده‌سازی و سرهمندی می‌شود. ساختار مکانیکی حسگر طراحی و ساخته می‌شود. با استفاده از میکروکنترلر ARM مغز متفکر و پردازشگر این سیستم اندازه‌گیری پیاده‌سازی می‌شود. سکوی تجربی تست این حسگر سطح‌سنچ که شامل کل فرآیند اندازه‌گیری، تبدیل، فیلتر، پردازش، مانیتورینگ و ارتباط با کامپیوتر است، پیاده‌سازی می‌شود. در نهایت برای بهبود رویکرد خطی‌شدن و افزایش دقت اندازه‌گیری، فرآیند کالیبراسیون با استفاده از نقاط مناسب اتخاذ شده است. در نهایت با آنالیز نتایج و داده‌های بدست آمده، پارامترهای اختصاصی حسگر مانند حساسیت و غیرخطی‌گری و غیره تعیین می‌شود. پس از طی همه‌ی این مراحل، این حسگر آماده تولید و ساخت بصورت انبوه به عنوان یک محصول تجاری می‌باشد.

**واژه‌های کلیدی:** حسگر سطح‌سنچ - خازن - سطح آب - کابل کواکسیال - برد الکترونیک

<sup>۱</sup> Signal Conditioning

<sup>۲</sup> PCB

## فهرست مطالب

۱	فصل ۱- کلیات	۱
۲	۱-۱- مقدمه	۱-۱
۲	۱-۱-۱- مروری بر سیستم‌های اندازه‌گیری	۱
۸	۱-۱-۲- آشنایی با حسگرهای اندازه‌گیری ارتفاع	۱
۱۱	۱-۲- طرح موضوع پژوهش	۱
۱۴	۱-۲-۱- حسگر خازنی	۱
۱۷	۱-۲-۲- بیان مساله	۱
۱۸	۱-۳- اهمیت پژوهش	۱
۱۹	۱-۴- پیشینه پژوهش	۱
۱۹	۱-۴-۱- شرکت‌های خارجی	۱
۲۲	۱-۴-۲- شرکت‌های داخلی	۱
۲۵	فصل ۲- روش انجام پژوهش	۱
۲۶	۲-۱- مقدمه	۲
۲۷	۲-۲- ساختار مکانیکی	۲
۲۷	۲-۲-۱- معادلات حاکم بر حسگر خازنی	۲
۲۹	۲-۲-۲- پیکربندی حسگر خازنی	۲
۳۲	۲-۲-۳- پیداکردن پیکربندی مناسب	۲
۳۴	۲-۲-۴- پیکربندی کابل شیلد دار	۲
۳۸	۲-۳-۱- روابط حاکم بر حسگر سطح سنج طراحی شده	۲
۴۰	۲-۳-۲- پیاده‌سازی و ساخت	۲
۴۴	۲-۳-۳- طراحی مدار الکترونیکی	۲
۴۴	۲-۳-۴- مدار آنالوگ	۲
۴۴	۲-۳-۵- مروری بر اسیلاتور	۵۵۵
۴۹	۲-۳-۶- شبیه‌سازی مدار اسیلاتور	۵۵۵
۵۰	۲-۳-۷- پیاده‌سازی اسیلاتور	۵۵۵
۵۲	۲-۳-۸- طراحی برد مدار چاپی	۵

۶۹	۴-۲- برنامه‌نویسی میکروکنترلر
۷۰	۵-۲- نرمافزار مانیتورینگ
۷۲	<b>فصل ۳- نتایج</b>
۷۳	۳-۱- راهاندازی آزمایشی
۷۵	۲-۳- تست عملکرد کابل کواکسیال
۷۹	۳-۳- تست عملکرد مدار آنالوگ
۸۳	۴-۳- تست عملکرد کلی حسگر
۸۴	۵-۳- آنالیز نتایج
۸۵	۳-۵-۱- غیر خطی گری
۸۶	۳-۵-۲- تفکیک پذیری
۸۷	۳-۵-۳- تکرار پذیری
۸۸	۴-۵-۴- پیماند
۹۰	۴-۵-۵- آنالیز حساسیت
۹۱	۴-۵-۶- کالیبراسیون
۹۲	۶-۳- بحث و نتیجه‌گیری
۹۴	<b>منابع</b>
۹۵	<b>پیوست‌ها</b>
۹۶	پیوست ۱ نقشه کیس محافظ
۹۸	پیوست ۲ نقشه ساختار اتصال کابل کواکسیال به وزنه استیل
۱۰۰	پیوست ۳ نقشه‌های برد مدار چاپی

## فهرست اشکال

..... ۳	..... شکل ۱: نمودار بلوکی یک سیستم اندازه‌گیری [1]
..... ۴	..... شکل ۲: حسگرهای معمول بوش که در یک خودرو استفاده می‌شود [2]
..... ۵	..... شکل ۳: اجزای سازنده یک سیستم اندازه‌گیری [1]
..... ۶	..... شکل ۴: ساختار برخی وسایل اندازه‌گیری سنتی [2]
..... ۷	..... شکل ۵: ساختار یک سیستم اندازه‌گیری مدرن [17]
..... ۸	..... شکل ۶: حسگرهای اندازه‌گیری سطح [18]
..... ۱۵	..... شکل ۷: نوعی حسگرخازنی [4]
..... ۱۷	..... شکل ۸: نمونه‌ای از حسگرهای خازنی محصول شرکت [7] Endress
..... ۱۹	..... شکل ۹: تصاویر از انواع مدل‌های حسگرهای شرکت [7] Endress
..... ۲۰	..... شکل ۱۰: تصاویر از انواع حسگرهای شرکت Vega [8]
..... ۲۱	..... شکل ۱۱: نمونه‌ای از محصولات شرکت زیمنس [9]
..... ۲۲	..... شکل ۱۲: حسگر سطح‌سنج محصول شرکت تبریز پژوه [23]
..... ۲۳	..... شکل ۱۳: حسگرهای ساخت شرکت پارس ارجمند دانش
..... ۲۶	..... شکل ۱۴: دیاگرام بلوکی کلی حسگر
..... ۲۷	..... شکل ۱۵: شماتیک خازن تخت
..... ۲۷	..... شکل ۱۶: خازن تخت [6]
..... ۲۸	..... شکل ۱۷: شماتیک خازن استوانه‌ای
..... ۲۸	..... شکل ۱۸: خازن استوانه‌ای [6]
..... ۲۹	..... شکل ۱۹: پیکربندی‌های مختلف خازن تخت [4]
..... ۲۹	..... شکل ۲۰: شماتیک پیکربندی حسگر با خازن تخت [19]
..... ۳۰	..... شکل ۲۱: پیکربندی خازن با دو مایع متفاوت [12]
..... ۳۲	..... شکل ۲۲: پیکربندی یک نوع حسگر سطح‌سنج مایعات [11]
..... ۳۲	..... شکل ۲۴: پیکربندی خازن تک پراب همراه کیس محافظ
..... ۳۲	..... شکل ۲۴: نمای پраб مسی
..... ۳۳	..... شکل ۲۵: شماتیک پیکربندی تک پраб همراه لوله PTFE [13]
..... ۳۴	..... شکل ۲۶: نمایی از یک کابل کواکسیال RG59
..... ۳۴	..... شکل ۲۷: نمای شماتیک کابل RG59 [5]
..... ۳۵	..... شکل ۲۸: نمای داخلی یک کابل کواکسیال [5]
..... ۳۵	..... شکل ۲۹: ساختار درونی پیکربندی یک حسگر سطح‌سنج [5]
..... ۳۶	..... شکل ۳۰: مدار معادل خازن‌های تشکیل شده در پیکربندی [5]
..... ۳۷	..... شکل ۳۱: شکل نمادین پیکربندی کامل حسگر سطح‌سنج خازنی [5]
..... ۴۰	..... شکل ۳۲: نمای ایزومتریک از کیس محافظ حسگر خازنی
..... ۴۱	..... شکل ۳۳: نمای داخلی کیس محافظ حسگرخازنی

۴۱	شکل ۳۴: گلند PG7 مورد استفاده از جنس پلی آمید
۴۲	شکل ۳۵: ساختار قرارگیری کابل کواکسیال داخل وزنه شناور
۴۲	شکل ۳۶: ساختار سیلندر استیل
۴۳	شکل ۳۷: نمای اسمبل شده اتصال کابل کواکسیال به وزنه شناور
۴۳	شکل ۳۸: ابزار ساخته شده برای قلاویز زدن در کارگاه تراش
۴۵	شکل ۳۹: دیاگرام ساده از مدار داخلی تایمر [14] ۵۵۵
۴۷	شکل ۴۰: مدار اسیلاتور ۵۵۵ استابل [14]
۴۷	شکل ۴۱: شکل موج خروجی اسیلاتور [14] ۵۵۵
۴۹	شکل ۴۲: مدار شبیه سازی اسیلاتور ۵۵۵ در پروتئوس
۴۹	شکل ۴۳: خروجی اسیلاتور ۵۵۵ در پروتئوس
۵۰	شکل ۴۴: پیاده سازی مدار اسیلاتور ۵۵۵ بربوری برد بورد
۵۰	شکل ۴۵: خروجی اسیلاتور در اسکوب همراه نویز
۵۱	شکل ۴۶: خروجی اسیلاتور در اسکوب بدون نویز پاور
۵۲	شکل ۴۷: شماتیک خلاصه مدار تغذیه
۵۵	شکل ۴۸: رگولاتور ۵ ولت [15] L7805
۵۵	شکل ۴۹: رگولاتور ۱۱۱۷، ۱۱۱۷، ۳۳ ولت
۵۶	شکل ۵۰: شماتیک مدار تایمر ۵۵۵
۵۶	شکل ۵۱: کانکتور BNC رو بردی [3]
۵۷	شکل ۵۲: اثر قراردادن خازن بعد از سیگنال خروجی تایمر
۵۷	شکل ۵۳: شماتیک مدار بافر
۵۸	شکل ۵۴: شماتیک مدار مقایسه کننده
۵۸	شکل ۵۵: آپ امپ LMV358
۵۸	شکل ۵۶: خروجی سیگنال اسیلاتور پس از Buffer
۶۰	شکل ۵۷: میکرو کنترلر ATmega [16]
۶۴	شکل ۵۸: معرفی کامل انواع میکرو کنترلرهای شرکت ST [21]
۶۴	شکل ۵۹: مقایسه انواع گروههای خانواده F1 [21]
۶۵	شکل ۶۰: نمای میکرو کنترلر STM32F103CBTx [20]
۶۵	شکل ۶۱: شماتیک مدار میکرو کنترلر stm32
۶۶	شکل ۶۲: شماتیک مدار MAX485
۶۷	شکل ۶۳: نمای دو بعدی PCB طراحی شده
۶۸	شکل ۶۴: نمای سه بعدی PCB طراحی شده
۶۹	شکل ۶۵: ورودی سیگنال به میکرو کنترلر [22]
۷۰	شکل ۶۶: ماژول تبدیل ارتباط RS485 به USB
۷۰	شکل ۶۷: نرم افزار مانیتورینگ طراحی شده برای حسگر
۷۳	شکل ۶۸: نمای کلی حسگر خازنی ساخته شده

.....74	شکل ۶۹: برد مدار چاپی قبل از اسمبل قطعات
.....74	شکل ۷۰: برد مدار چاپی بعد از اسمبل قطعات
.....77	شکل ۷۱: نمودار تست عملکردی خازن کابل کواکسیال
.....77	شکل ۷۲: مقایسه ظرفیت خازن کابل کواکسیال و مقدار تئوری
.....79	شکل ۷۳: بررسی خروجی سیگنال مدار آنالوگ در حسگر بدون تماس با آب
.....80	شکل ۷۴: خروجی سیگنال آی‌سی ۵۵۵ در حالت خازن درون آب
.....80	شکل ۷۵: خروجی مقایسه‌کننده در حالت خازن درون آب
.....81	شکل ۷۶: تست عملکرد مدار آنالوگ با ولتاژ کاری ۱۲V
.....81	شکل ۷۷: تست عملکرد مدار آنالوگ با ولتاژ کاری ۱۲V در آب
.....83	شکل ۷۸: دیتا خروجی میکروکنترلر
.....85	شکل ۷۹: نمودار غیرخطی‌گری حسگر
.....87	شکل ۸۰: نمودار خطای تکرارپذیری در تست عملکردی خازن کواکسیال
.....88	شکل ۸۱: نمودار هیسترزیس تست عملکرد خازن کواکسیال
.....88	شکل ۸۲: نمودار درصد خطای هیسترزیس تست عملکرد خازن کواکسیال

## فهرست جداول

جدول ۱: مقایسه مزایا و معایب انواع حسگرهای اندازه‌گیری سطح	۱۲
جدول ۲: مقایسه انواع مدل‌های شرکت [7] Endress	۱۹
جدول ۳: مقایسه چند مدل از حسگرهای شرکت [8] Vega	۲۰
جدول ۴: مقایسه دو مدل از حسگر شرکت زیمنس [9]	۲۱
جدول ۵: مقایسه دو مدل از محصولات شرکت تبریز پژوه	۲۲
جدول ۶: مقایسه دو محصول شرکت پارس ارجین دانش	۲۳
جدول ۷: پارامترهای روابط حاکم	۳۸
جدول ۸: نتایج تست خازن کابل کواکسیال PVC	۷۵

## فهرست معادلات

معادله ۱: ظرفیت خازن تخت	۲۷
معادله ۲: ظرفیت خازن استوانه‌ای	۲۸
معادله ۳: رابطه ظرفیت خازن‌های تشکیل شده در کابل کواکسیال	۳۸
معادله ۴: رابطه ظرفیت خازن مرجع ثابت	۳۸
معادله ۵: رابطه ظرفیت خازن معادل	۳۸
معادله ۶: رنج ظرفیت خازن تشکیل شده [5]	۳۸
معادله ۷: فرمول محاسبه تناوب یک دوره خروجی تایمر	۴۸
معادله ۸: فرمول محاسبه دوره تناوب خروجی تایمر	۴۸
معادله ۹: فرکانس خروجی اسیلاتور	۴۸
معادله ۱۰: فرمول چرخه وظیفه اسیلاتور	۴۸
معادله ۱۱: معادله خط فیت شده بر دیتا تست عملکردی خازن کابل کواکسیال	۷۸
معادله ۱۲: معادله رزولوشن حسگر	۸۶
معادله ۱۳: معادله حساسیت حسگرخازنی طراحی شده	۹۰
معادله ۱۴: مدل اتخاذ شده برای کالیبراسیون	۹۱

# فصل ۱- کلیات

## ۱-۱-۱-۱ مقدمه

## ۱-۱-۱-۱-۱ مروری بر سیستم‌های اندازه‌گیری

تکنیک‌های اندازه‌گیری از زمان شروع تمدن بشری که اندازه‌گیری‌ها برای تنظیم انتقال کالا در تجارت مبادله برای اطمینان از عادلانه بودن مبادلات مورد نیاز بود، از اهمیت فوق العاده‌ای برخوردار بوده‌اند. انقلاب صنعتی در طول قرن نوزدهم توسعه سریعی از ابزارهای جدید و تکنیک‌های اندازه‌گیری را برای تأمین نیازهای تولیدکنندگان صنعتی به وجود آورد. از آن زمان، رشد گسترده و سریعی در فناوری جدید صنعتی اتفاق افتاده است. این امر به ویژه در انتهای قرن بیستم و با تشید تحولات الکترونیک به طور کلی و کامپیوتر به طور خاص، آشکار شده است. این، به نوبه خود، به رشد موازی ابزارهای جدید و تکنیک‌های اندازه‌گیری نیاز دارد.

رشد گسترده در کاربرد رایانه‌ها برای کنترل و نظارت بر فرایندهای صنعتی باعث رشد موازی نیاز دستگاه‌ها برای اندازه‌گیری، ثبت و کنترل متغیرهای فرآیند شده است. همان‌طور که تکنیک‌های مدرن تولید محصول بر روی محدودیت‌های دقیق و دقیق‌تر را الزام می‌کنند، و با شدت گرفتن نیروهای اقتصادی که هزینه‌های تولید را محدود می‌کنند، برآورده سازی نیاز به ابزار دقیق و ارزان نیز دشوارتر می‌شود. این مشکل اخیراً در کانون تلاش‌های تحقیق و توسعه همه تولیدکنندگان ابزار است. در چند سال گذشته، مقرون به صرفه‌ترین وسیله برای بهبود دقت ابزار در بسیاری از موارد گنجاندن قدرت محاسبات دیجیتال در خود ابزارها بوده است. بنابراین این ابزارهای هوشمند به طور برجسته در کاتالوگ سازندگان سازهای فعالی برجسته هستند. [1]

امروزه تکنیک‌های اندازه‌گیری در اکثر وجهه تمدن بشری از اهمیت فوق العاده‌ای برخوردار هستند. کاربردهای این روزهای ابزار اندازه‌گیری را می‌توان در سه حوزه اصلی طبقه‌بندی کرد. اولین آن‌ها استفاده از آن‌ها در تنظیم تجارت است، با استفاده از ابزاری که مقادیر فیزیکی مانند طول، حجم و جرم را بر حسب واحد استاندارد اندازه‌گیری می‌کند.

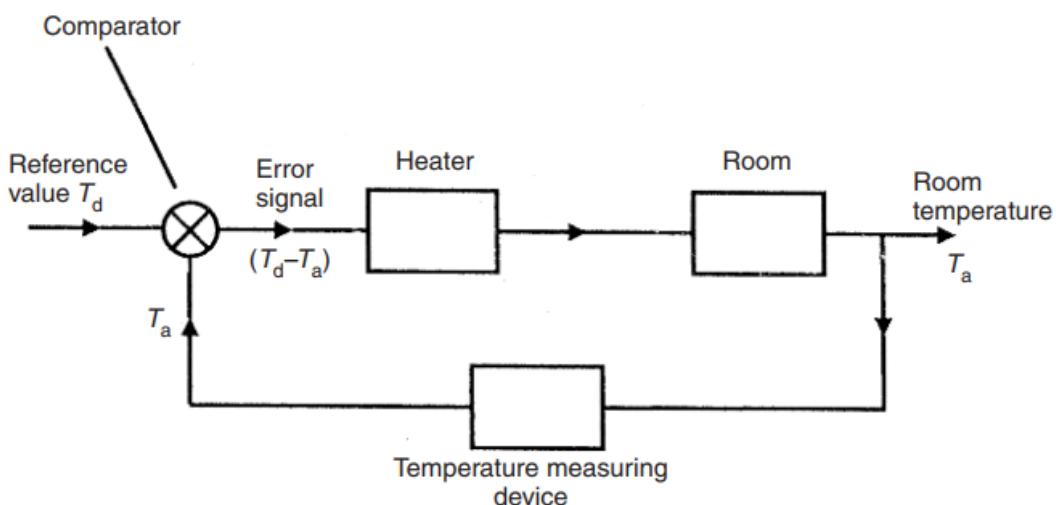
دومین استفاده کاربردی ابزار اندازه‌گیری در کاربردهای نظارتی آلت است. این‌ها اطلاعاتی را فراهم می‌کنند که بشر را قادر می‌سازد بر اساس آن اقدامات مشخصی را انجام دهد. باغبان از یک دما‌سنج استفاده می‌کند تا تعیین کند که آیا باید سیستم گرمایش را در گلخانه خود روشن کند یا اگر گرم است پنجره‌ها را باز کند. مطالعه منظم فشارسنج به ما این امکان را می‌دهد تا با پیش‌بینی وضعیت‌ها، تصمیم بگیریم که اگر قصد داریم چند ساعت بیرون برویم، باید چترهای خود را برداریم یا نه. در حالیکه در زندگی عادی خانگی ما کاربردهای زیادی برای ابزار دقیق وجود دارد، عمدۀ عملکردهای نظارتی برای فراهم کردن اطلاعات لازم برای کنترل یک کار یا فرآیند صنعتی توسط انسان می‌باشد. به عنوان مثال در یک فرآیند شیمیایی، پیشرفت واکنش‌های شیمیایی با اندازه‌گیری دما و فشار در نقاط مختلف نشان داده می‌شود، و چنین اندازه‌گیری‌هایی به اپراتور اجازه می‌دهد تا تصمیمات صحیحی در مورد منبع الکتریکی بخاری‌ها، جریان آب خنک‌کننده، موقعیت شیرها و غیره اتخاذ کند. یکی دیگر از کاربردهای مهم ابزارهای نظارت، کالیبراسیون ابزارهای مورد استفاده در سیستم‌های کنترل فرآیند خودکار است که در زیر توضیح داده شده است.

استفاده به عنوان بخشی از بازخورد<sup>۳</sup> خودکار سیستم‌های کنترلی، کاربرد سوم سیستم‌های اندازه‌گیری است. شکل ۱ نمودار بلوکی عملکردی از یک سیستم کنترل دما ساده را نشان می‌دهد که در آن دمای  $T_a$  اتاق در مقدار مرجع  $T_d$  حفظ می‌شود. مقدار متغیر کنترل شده  $T_a$ ، همان‌طور که توسط دستگاه اندازه‌گیری دما تعیین می‌شود، با مقدار مرجع  $T_d$  مقایسه می‌شود و

<sup>3</sup> Monitoring Functions

<sup>4</sup> Feedback

اختلاف  $\epsilon$  به عنوان یک سیگنال خطابه بخاری اعمال می‌شود. سپس بخاری دمای اتاق را  $T_d = T_a$  تغییر می‌دهد. ویژگی‌های ابزار اندازه‌گیری مورد استفاده در هر سیستم کنترل بازخورد از اهمیت اساسی برای کیفیت کنترل به دست آمده برخوردار است. دقیق و واضح کنترل متغیر خروجی یک فرآیند هرگز نمی‌تواند بهتر از دقت و واضح ابزار اندازه‌گیری مورد استفاده باشد. این یک اصل بسیار مهم است، اما اغلب در بسیاری از متون در مورد سیستم‌های کنترل خودکار به طور ناکافی مورد بحث قرار می‌گیرد. این متون جنبه‌های نظری طراحی سیستم کنترل را در عمق قابل توجهی بررسی می‌کنند، اما تأکید کافی بر این واقعیت ندارند که تمام محاسبات عملکرد حاشیه فاز و غیره کاملاً به کیفیت اندازه‌گیری‌های فرآیند بدست آمده بستگی دارد. تمام این بحث‌ها دلیلی بر اهمیت سیستم‌های اندازه‌گیری در سیستم‌های کنترلی است.

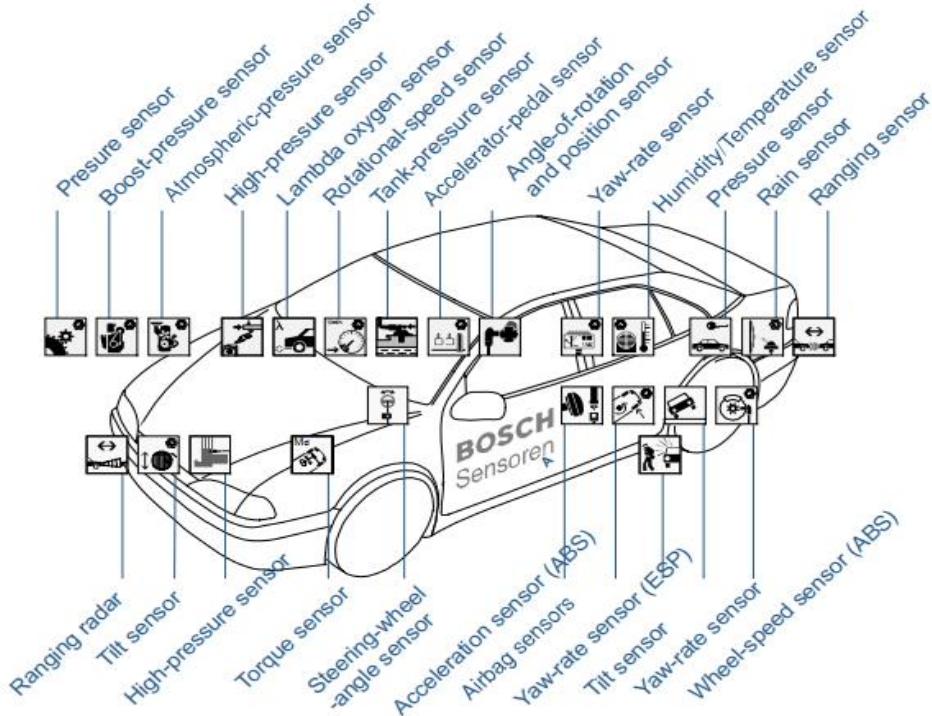


شکل ۱: نمودار بلوکی یک سیستم اندازه‌گیری [1]

امروزه دستگاه‌های اندازه‌گیری تقریباً در همه جا وجود دارند. مثلاً اگر به یک خودرو نگاه کنیم نکات جالبی را خواهیم دید. مدتی پیش یک ماشین معمولی فقط به چندین ابزار اندازه‌گیری مجهز شده بود (برای تشخیص سطح سوخت، سرعت خودرو، دمای موتور). امروزه، ده‌ها (یا اغلب صدها) سنسور مختلف در هر ماشین جدیدی نصب شده است. شکل زیر از سنسورهای مهم برای امنیت خودرو (آزمایش سرعت چرخش هر چرخ در سیستم ABS)، سنسورها گوشه موقعیت صندلی‌ها برای ذخیره‌سازی موقعیت (راابت بوش ۲۰۰۲، جیری ۳۰۰۳)، عملکرد کیسه‌های هو توسعه حسگرهای تنفس کنترل می‌شود. غالباً برای پاک‌کن‌های شیشه‌ای با توجه به شدت بارندگی کنترل می‌شوند. بسیاری از رانندگان نمی‌دانند چگونه بدون ردیاب‌های اولتراسونیک بدون مشکل از موانع عبور کنند. جای تعجب نیست که ماشین به سیستم مکان‌یاب ماهواره‌ای (سیستم موقعیت یابی جهانی<sup>۵</sup>) مجهز شود. تعداد حسگرهای به قدری زیاد است که یک رابط ویژه<sup>۶</sup> CAN طراحی شده توسعه بوش برای اتصال سنسورهای هوشمند در برنامه‌های خودرو وجود دارد. سنسورهای مدرن (به اصطلاح سنسورهای هوشمند یا هوشمند) به رابطهای ارتباطی مناسب (پروتکل‌های ethernet, CAN, RS-232) متصل هستند و امکان اتصال مستقیم آنها به سیستم شبکه وجود دارد. میکروکنترلرهای ویژه‌ای نیز وجود دارند که مجهز به خروجی CAN هستند.

<sup>5</sup> GPS

<sup>6</sup> Controller Area Network



شکل ۲: حسگرهای معمول بوش که در یک خودرو استفاده می‌شود [2]

یک سیستم اندازه‌گیری برای ارائه اطلاعات در مورد مقدار فیزیکی برخی از متغیرهای اندازه‌گیری شده وجوددارد. در موارد ساده، سیستم می‌تواند فقط از یک واحد منفرد تشکیل شود که با توجه به اندازه متغیر ناشناخته اعمال شده، یک خوانش یا سیگنال خروجی می‌دهد. با این وجود، در شرایط اندازه‌گیری پیچیده‌تر، یک سیستم اندازه‌گیری از چندین عنصر جداگانه تشکیل شده است که در شکل ۳ نشان داده شده است. این اجزا ممکن است در یک یا چند جعبه وجود داشته باشند و جعبه‌هایی که عناصر اندازه‌گیری منفرد را در خود دارند ممکن است نزدیک هم باشند یا از نظر فیزیکی جدا باشند. اصطلاح ابزار اندازه‌گیری معمولاً برای توصیف یک سیستم اندازه‌گیری استفاده می‌شود، خواه فقط شامل یک عنصر باشد یا عناصر زیادی، و این اصطلاح به طور گسترده در کل این متن استفاده خواهد شد.

اولین عنصر در هر سیستم اندازه‌گیری سنسور اصلی است: این یک خروجی را می‌دهد که تابعی از اندازه‌گیری است (ورودی اعمال شده به آن)، برای اکثر اما نه همه سنسورها، این عملکرد حداقل تقریباً خطی است. مثال‌هایی از نمونه‌های سنسورهای اولیه، دماسنجد مایع درون شیشه، ترموکوپل و فشارسنج هستند. در مورد دماسنجد جیوه در شیشه، بازده خروجی بر حسب سطح جیوه داده می‌شود و بنابراین این سنسور اصلی خاص نیز به خودی خود یک سیستم اندازه‌گیری کامل است. با این حال، به طور کلی، سنسور اصلی تنها بخشی از یک سیستم اندازه‌گیری است.

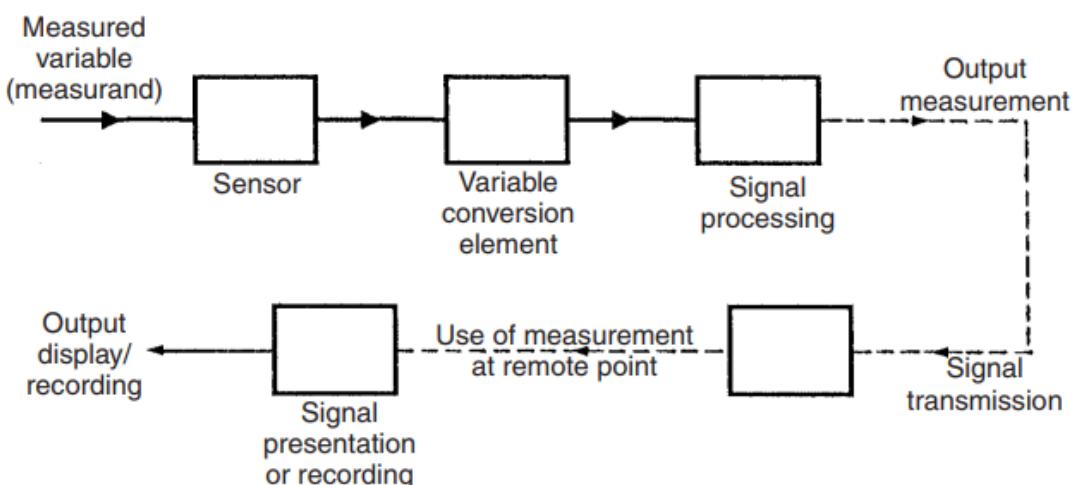
عناصر تبدیل متغیر در مواردی مورد نیاز هستند که متغیر خروجی مبدل اولیه به شکل ناخوشایند باشد و باید به فرم راحت‌تری تبدیل شود. به عنوان مثال، کرنش‌سنج اندازه‌گیری جایه‌جایی دارای یک خروجی به شکل یک مقاومت متفاوت است. تغییر مقاومت را نمی‌توان به راحتی اندازه گرفت و بنابراین توسط یک مدار پل، که نمونه‌ای معمول از یک عنصر تبدیل متغیر است،

به تغییر ولتاژ تبدیل می شود، در بعضی موارد، حسگر اصلی و عنصر تبدیل متغیر با هم ترکیب می شوند و این ترکیب به عنوان مبدل<sup>7</sup> شناخته می شود.

عناصر پردازش سیگنال<sup>8</sup> به منظور بهبود کیفیت خروجی سیستم اندازه گیری به نوعی وجود دارند. یک نوع بسیار رایج از عناصر پردازش سیگنال، تقویت کننده الکترونیکی است که خروجی مبدل اولیه یا عنصر تبدیل متغیر را تقویت می کند، بنابراین حساسیت و پوشش اندازه گیری را بهبود می بخشد. این عنصر از یک سیستم اندازه گیری در جایی که مبدل اولیه دارای خروجی سطح پایین باشد از اهمیت ویژه ای برخوردار است. به عنوان مثال، خروجی معمول ترموموکوپلها تنها چند میلی ولت است. انواع دیگر عناصر پردازش سیگنال مواردی هستند که نویز ناشی از آن را فیلتر می کنند و سطح متوسط را از بین می برنند. در برخی از دستگاهها، پردازش سیگنال در مبدل گنجانیده می شود، که به عنوان یک فرستنده<sup>9</sup> شناخته می شود. [2]

در برخی از موارد، کلمه حسگر<sup>10</sup> به طور عام بجای مبدل و فرستنده استفاده می شود.

علاوه بر این سه جزء که قبل از ذکر شد، برخی از سیستم های اندازه گیری دارای یک یا دو جزء دیگر هم هستند؛ اول از همه برای این که سیگنال را به نقطه ای دیگر از راه دور منتقل کنند و ثانیا اگر سیگنال به طور خودکار در سیستم کنترلی تامین نشود، آن را نمایش یا ضبط کند. انتقال سیگنال زمانی لازم است که نقطه مشاهده یا کاربرد خروجی یک سیستم اندازه گیری از محل مبدل اولیه فاصله داشته باشد. گاهی اوقات، این جداسازی صرفاً به منظور سهولت انجام می شود، اما بیشتر اوقات از عدم دسترسی فیزیکی یا نامناسب بودن محیط سایت مبدل اصلی برای نصب واحد نمایش یا ضبط سیگنال ناشی می شود. عنصر انتقال سیگنال به طور سنتی از کابل تک یا چند هسته ای تشکیل شده است که اغلب به منظور به حداقل رساندن خرابی سیگنال توسط نویز الکتریکی، استفاده می شود. با این حال، کابل های فیبر نوری در تأسیسات مدرن به طور فزاینده ای مورد استفاده قرار می گیرند، بخشی از این امر به دلیل از عدم تاثیرپذیری از میدان های الکتریکی و مغناطیسی و از دستدادن سیگنال انتقال است.



شکل ۳: اجزای سازنده یک سیستم اندازه گیری [1]

<sup>7</sup> Transducer

<sup>8</sup> Signal Processing

<sup>9</sup> Transmitter

<sup>10</sup> Sensor

آخرین عنصر اختیاری در یک سیستم اندازه‌گیری، نقطه‌ای است که از سیگنال اندازه‌گیری شده استفاده می‌شود. در بعضی موارد، این عنصر به کلی حذف می‌شود زیرا اندازه‌گیری به عنوان بخشی از یک سیستم کنترلی خودکار استفاده می‌شود و سیگنال منتقل شده مستقیماً به سیستم کنترلی داده می‌شود. در موارد دیگر، این عنصر در سیستم اندازه‌گیری یا به شکل یک واحد ارائه سیگنال یا یک واحد ضبط سیگنال است. این‌ها با توجه به نیازهای کاربردهای اندازه‌گیری خاص، اشکال مختلفی دارند و طیف وسیعی از اجزا را شامل می‌شوند.

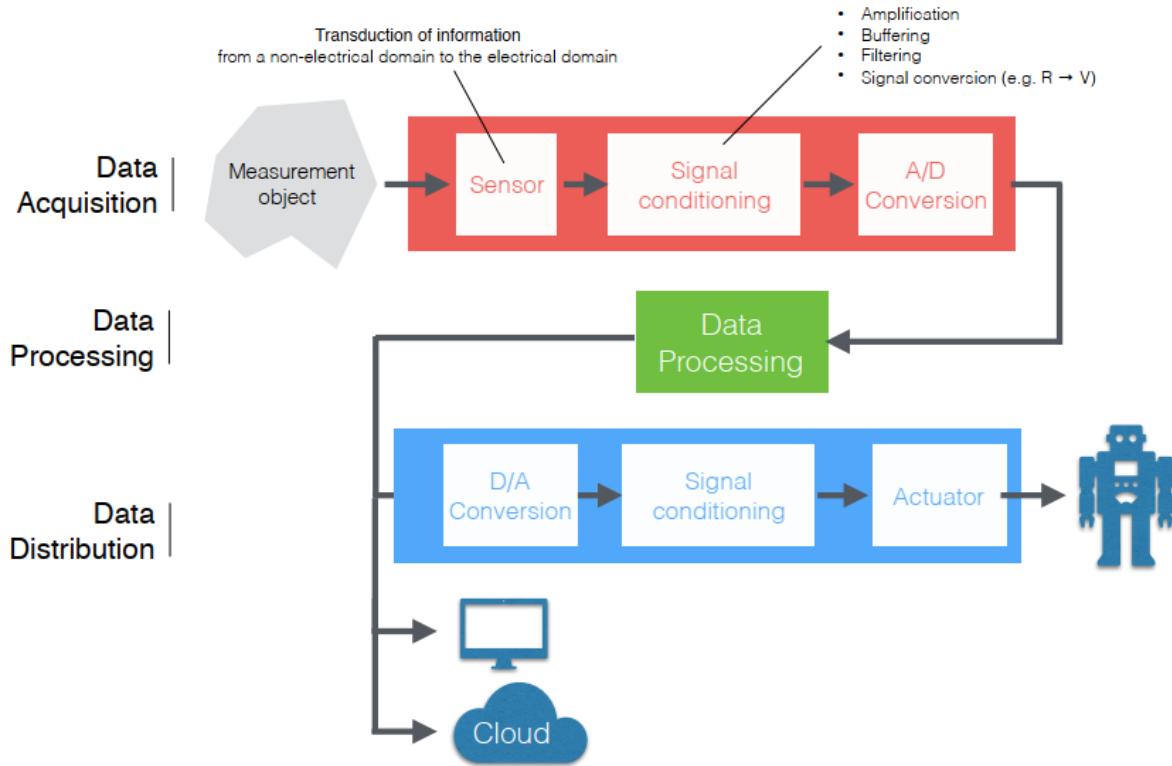
اخیراً تکنیک‌های اندازه‌گیری به طور قابل توجهی تغییر کرده‌اند. با توجه به پیشرفت انفورماتیک، میکروالکترونیک و مکاترونیک می‌توان انقلاب واقعی را در اندازه‌گیری‌ها مشاهده کرد. به طور کلی دستگاه‌های اندازه‌گیری با سیستم‌های منعطف و جهانی کامپیوتری اندازه‌گیری جایگزین می‌شوند. گسترش سیستم‌های رایانه‌ای باعث تحریک توسعه فناوری حسگر، سیستم‌های رابط، تکنیک‌های پردازش سیگنال، پردازنده‌های سیگنال دیجیتال<sup>۱۱</sup>، نرم افزار اندازه‌گیری (ابزارهای مجازی) و روش‌های هوشمند تجزیه و تحلیل داده‌ها می‌شود. بسیاری از دستگاه‌های اندازه‌گیری از بازار ناپدید شدند. در کاربردهای معمول، فقط چندین دستگاه به عنوان «دستگاه اندازه‌گیری» باقی مانده‌اند، به عنوان مثال: مولتی متر دیجیتال، اسیلوسکوپ دیجیتال و مولد موج دلخواه. با استفاده از این سه دستگاه و واحد رایانه‌ای می‌توان سیستم‌های اندازه‌گیری متنوعی را طراحی کرد. اما تفکر ساده شده این است که روش مدرن اندازه‌گیری تنها به این معنی است که اندازه‌گیری‌های آنالوگ توسط دیجیتال و فعالیت انسان توسط کامپیوتر جایگزین می‌شود. کل فلسفه اندازه‌گیری تغییر کرده است. بسیاری از روش‌های سنتی از بین رفته و بسیاری از روش‌های جدید در حال توسعه هستند. [2]



شکل ۴: ساختار برخی وسایل اندازه‌گیری سنتی [2]

<sup>11</sup> DSP

شکل ۴ ساختار اندازه‌گیری سنتی را که تا چندین سال پیش مورد استفاده واقع می‌شد را نشان می‌دهد. در حقیقت با استفاده از این دستگاه‌ها می‌شود یکسری از پارامترهای اولیه مانند ولتاژ، جریان و غیره را اندازه‌گیری کرد. اما پیشرفت تکنولوژی و استفاده بیشتر از ریزپردازندۀ‌ها<sup>۱۲</sup> در سیستم‌های اندازه‌گیری موجب شد تا تغییراتی شگرف در ساختار این سیستم‌ها بوجود بیاید. در ادامه به تشریح بخش‌های مختلف یک سیستم اندازه‌گیری پرداخته خواهد شد.



شکل ۵: ساختار یک سیستم اندازه‌گیری مدرن [17]

شکل ۵ نمودار بلوکی<sup>۱۳</sup> یک سیستم اندازه‌گیری را از ابتدا تا انتهای نشان می‌دهد. پارامتر قابل اندازه‌گیری پس از عبور از حسگر، به شکل یک سیگنال الکتریکی تبدیل شده که با عبور از مرحله پردازش سیگنال، دچار تغییراتی می‌شود که آماده‌ی ورود به سیستم‌های کامپیوتری نظیر میکروکنترلرها می‌شود. برای ورود به این سیستم‌ها لازم است که سیگنال به حالت دیجیتال تبدیل شود. لذا از یک المان D/A استفاده می‌شود تا سیگنال آنالوگ به سیگنال دیجیتال تبدیل بشود. پس از عبور از المان پردازش گر نظیر میکروکنترلرها از داده‌ی بدست آمده دو استفاده می‌شود: اولاً داده را در حافظه ذخیره شود؛ دوماً داده را به عملگرها<sup>۱۴</sup> داده تا عملیاتی را پیاده‌سازی کنند. مانند یک سنسور دماسنج که درصورتی که دمای محیط از حدی مشخص کمتر شود، سیستم تهویه می‌حط را خاموش می‌کند. البته خود این عملگرها از آن جا که اغلب بصورت مکانیکی هستند نیازمند آن هستند تا سیگنال آنالوگ به آن‌ها داده شود لذا باید سیگنال دیجیتال خروجی از یک میکروکنترلر را با استفاده از یک المان D/A به یک سیگنال آنالوگ تبدیل کرد سپس با عبور از یک المان برازش سیگنال<sup>۱۵</sup> آماده استفاده از سیگنال در عملگرها شد.

<sup>12</sup> Microcontroller

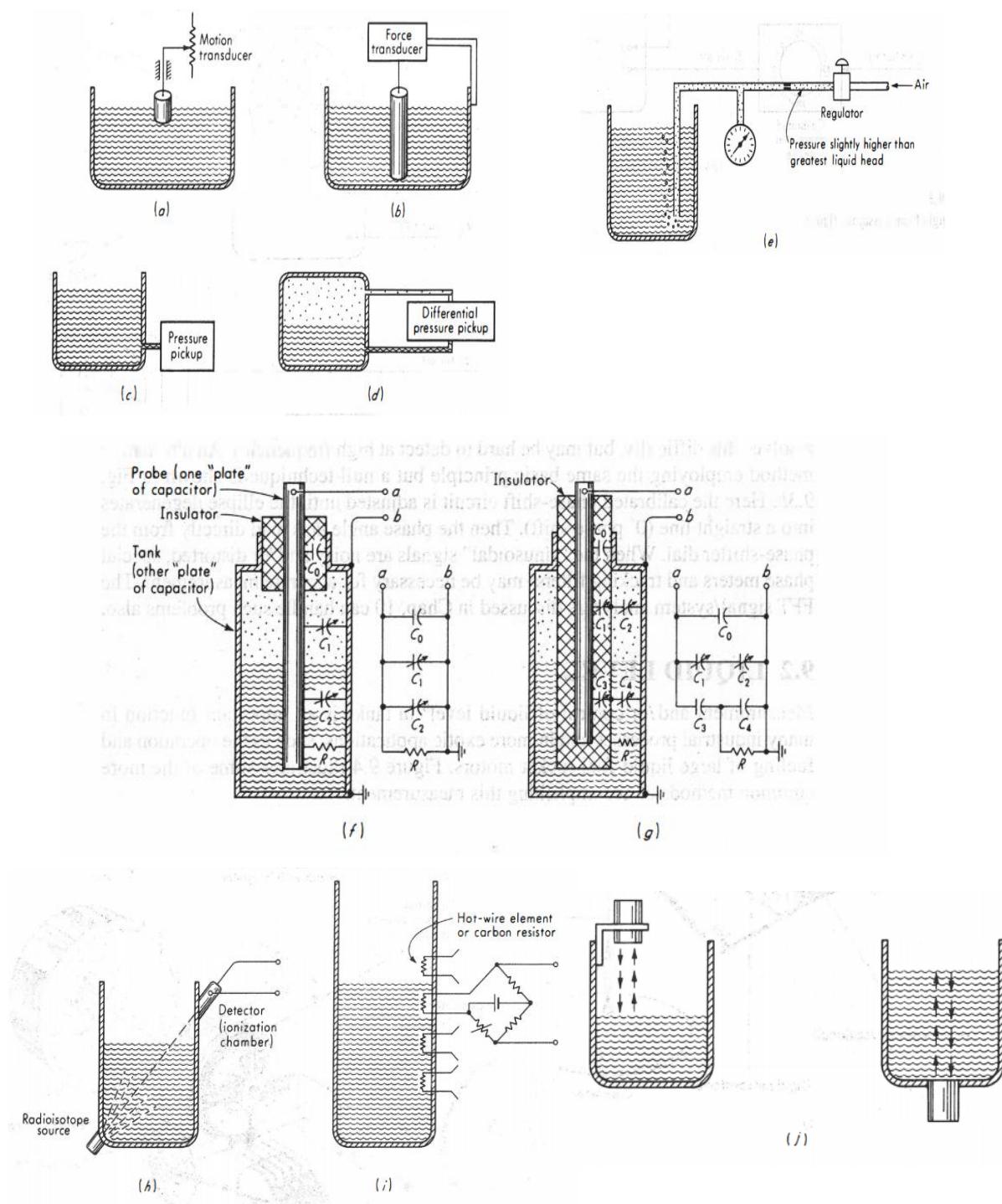
<sup>13</sup> Block diagram

<sup>14</sup> Actuator

<sup>15</sup> Signal Conditioning

## ۱-۲-۱- آشنایی با حسگرهای اندازه‌گیری ارتفاع

اندازه‌گیری و یا کنترل سطح مایعات در مخازن عملکرد مهمی در بسیاری از فرآیندهای صنعتی و در کاربردهای گوناگون مانند مخازن سوخت موتورهای بزرگ موشک سوخت مایع است. شکل زیر برخی از متداول‌ترین روش‌های انجام این اندازه‌گیری را نشان می‌دهد.



شکل ۶: حسگرهای اندازه‌گیری سطح [18]

شناور ساده شکل a را می‌توان به یک مبدل حرکت مناسب متصل کرد تا سیگنال الکتریکی متناسب با سطح مایع تولید کند. شکل b یک جابجایی را نشان می‌دهد که دارای حرکت ناچیزی است و سطح مایع را از نظر نیروی شناور با استفاده از مبدل نیرو اندازه‌گیری می‌کند. واحدی که برای نظارت بر سطح روغن در موتورها، انتقال نیروها و جعبه دنده‌ها در نظر گرفته شده است، از یک محرک استوانه‌ای توخالی استفاده می‌کند که توسط فنرها مهار می‌شود. تغییر مقیاس کامل در سطح باعث حرکت در حدود ۰.۰۷۰ اینچ می‌شود که توسط سنسور اثر هال اندازه‌گیری می‌شود تا یک تغییر ولتاژ از ۱ ولت (حالی) تا ۴ ولت (کامل) ایجاد کند. توجه داشته باشید که در صورت تغییر سطح مایع فقط به دلیل تغییر دما، محرک تغییر مکان نخواهد کرد (در مقایسه با شناور). این مطلوب است زیرا، هنگامی که دما تغییر می‌کند (در موتورها و گیربکس‌ها معمول است)، مقدار مایعات تغییر نکرده است، بنابراین یک سنسور سطح نباید تغییر را نشان دهد. از آنجا که فشار هیدرواستاتیک مستقیماً به سطح مایع مربوط می‌شود، طرح‌های سنجش فشار از شکل c و d به ترتیب اجازه اندازه‌گیری سطح مایع را در مخازن باز و فشار می‌دهند. در حباب ساز یا سیستم تصفیه شکل e، فشار گاز در پایین جریان محدودیت جریان همان سر هیدرواستاتیک بالای انتهای لوله حباب است. جریان گاز بسیار کم است. یک بطری نیتروژن که به عنوان منبع گاز تحت فشار استفاده می‌شود ممکن است شش ماه یا بیشتر دوام داشته باشد. از تنوع ظرفیت به روش‌های مختلف برای سنجش سطح استفاده شده است.

از تغییرات ظرفیت خازن به روش‌های مختلف برای سنجش سطح استفاده شده است. برای مایعات غیررسانا (هدایت کمتر از ۱ cm<sup>3</sup>/S)، پرابهای عریان شکل f<sup>۱۶</sup> و ممکن است رضایت بخش باشد زیرا مقاومت مایع به اندازه کافی بالا است. برای مایعات رسانا، پروب باید مانند شکل g از عایق بندی شود تا از اتصال کوتاه ظرفیت توسط مقاومت مایع جلوگیری شود. اندازه‌گیری ظرفیت بین پایانه‌های ab ممکن است به روش‌های مختلفی انجام شود. با این حال، روش‌های فرکانس بالا ac (فرکانس رادیویی) مزایای قابل توجهی را ارائه می‌دهند. تکنیک‌های اندازه‌گیری سطح خازن با بسیاری از مایعات رایج، جامدات پودرشده یا دانه‌ای، فلزات مایع (دمای بالا)، گازهای مایع (دمای پایین)، مواد خورنده مانند اسید هیدروفلوریک و در فرآیندهای بسیار فشار بالا استفاده شده است.

شکل h استفاده از رادیو ایزوتوب‌ها را برای اندازه‌گیری سطح نشان می‌دهد. از آنجا که جذب اشعه بتا یا اشعه گاما با ضخامت ماده جاذب بین منبع و آشکارساز متفاوت است، ممکن است سیگنالی مربوط به سطح مخزن ایجاد شود.

شکل I روش استفاده از عناصر مقاومت در برابر سیم گرم یا کربن برای اندازه‌گیری سطح مایع را با افزایش گسسته نشان می‌دهد. مفهوم اساسی این است که ضریب انتقال حرارت در سطح عنصر مقاومت وقتی سطح مایع از آن عبور می‌کند به طور بنیادی تغییر می‌کند. این باعث تغییر دمای تعادل و در نتیجه مقاومت آن می‌شود و باعث تغییر ولتاژ خروجی پل می‌شود. با قرار دادن عناصر مقاومت در فواصل مشخص شده از ارتفاع، سطح مخزن ممکن است به صورت گسسته اندازه‌گیری شود.

تکنیک‌های بردیابی<sup>۱۷</sup> التراسونیک، همانطور که در J می‌توان برای سنجش سطح مایع استفاده کرد. رadar حسگرهای سطح مایع از اصول مشابه، با انرژی مایکروویو به جای صوتی استفاده می‌کنند. دو نسخه بدون تماس و موج هدایت‌شونده در دسترس هستند.

سنسورهای ارتفاع سطح مایعات، سطح سیالات و جامدات سیال از جمله دوغاب‌ها، مواد دانه‌ای و پودرهایی که سطح بالای آنها آزاد است، تشخیص می‌دهد. ماده‌ای که اندازه‌گیری می‌شود می‌تواند در داخل یک ظرف باشد یا به شکل طبیعی آن مثلاً یک رودخانه یا دریاچه باشد. اندازه‌گیری سطح می‌تواند مقادیر پیوسته یا گسسته داشته باشد. حسگرهای سطح پیوسته سطح را در یک محدوده مشخص اندازه‌گیری می‌کنند و مقدار دقیق ماده را در یک مکان خاص تعیین می‌کنند در حالی که سنسورهای

<sup>16</sup> Bare probe

<sup>17</sup> Range-Finding

سطح گسسته فقط نشان می‌دهند ماده بالاتر یا پایین‌تر از ماده حسگر است. به طور کلی در حالت گسسته فقط بیشتر یا کمتر از یک حد مشخص قابل تشخیص می‌باشد. پارامترهای فیزیکی و کاربردی بسیاری وجود دارند که در انتخاب روش بهینه مانیتورینگ سطح مایعات در فرایندهای صنعتی و تجاری تاثیر می‌گذارند. [3]

پارامترهای حیاتی برای انتخاب شامل: فاز (مایع، جامد، میان‌دوفاز)، دما، فشار خلاء، خصوصیات شیمایی، ثابت دی‌الکتریک، چگالی، نویزپذیری الکتریکی، ارتعاش‌پذیری، شوک‌پذیری مکانیکی و ابعاد و اندازه و شکل مخزن هستند. همچنین برخی محدودیت‌های کاربردی مهم هستند: قیمت، دقت، شکل ظاهری، میزان پاسخ، سهولت کالibrاسیون یا برنامه‌ریزی، اندازه فیزیکی و نصب دستگاه، نظارت یا کنترل سطح پیوسته یا گسسته. به طور خلاصه، حسگرهای سنجش سطح یکی از مهم‌ترین حسگرها است و نقش بسیار کلیدی در کاربردهای گوناگون صنعتی یا خانگی ایفا می‌کند. همانند سایر انواع حسگرها، سنسورهای سنجش سطح نیز یا در بازار موجود هستند و یا بر اساس اصول اندازه‌گیری قابل طراحی هستند. انتخاب نوع مناسب سنسور متناسب با نیاز و استفاده بسیار مهم است. [4]

## ۲-۱ - طرح موضوع پژوهه

سنچش سطح مایعات در محیط‌های با شرایط مختلف از قدیم یک مساله پیچیده بوده است. بطور مثال اندازه‌گیری سطح مایعات سوختنی در محیط‌های قابل اشتعال و انفجار همیشه یک چالش فنی بوده است. به طور کلی، سطح مایع را می‌توان با روش‌های مختلف گزارش شده مانند شناور، فشار مغناطیسی مافوق صوت، فشار دیفرانسیل، روش‌های نوری و خازنی و غیره تشخیص داد.

سنسورهای شناور معمولی معمولاً از یک شناور بزرگ به عنوان عنصر اندازه‌گیری استفاده می‌کنند. اگرچه این سنسورها ساختاری ساده و قیمت ارزان تری دارند اما به دلیل آسیب پذیری در برابر آسیب مکانیکی و هزینه نگهداری زیاد، کاربرد آنها محدود است. علاوه بر این، وزن و حجم سیستم مکانیکی نیز باید در نظر گرفته شود.

سنسورهای سطح مایع التراسونیک معمولاً با انتشار سیگنال‌های صوتی با فرکانس بالا که بازتابانده می‌شوند و توسط مبدل شناسابی می‌شوند، کار می‌کنند. زمان انتقال سیگنال با سطح مایع مطابقت دارد. سنسورهای اولتراسونیک از مزایای ساختار ساده، نصب و نگهداری آسان برخوردار هستند، اما در معرض تداخل هستند و وجود مدار تشید RLC با اجزای بزرگ ذخیره انرژی، دستیابی به عملکرد ذاتی را دشوار می‌کند. روش اندازه‌گیری سطح مایع مغناطیسی بر اساس تشخیص زمان انتشار موج الاستیک تولید شده توسط اثر مغناطیسی در مواد فرو مغناطیسی است. با استفاده از مزایای دقت بالا، مقیاس بزرگ و امنیت الاستیک تولید شده سطح مایع مغناطیسی برای اندازه‌گیری سطح مایع در محیط‌های قابل اشتعال و منفجره استفاده کرد. بالا، می‌توان از سنسور سطح مایع مغناطیسی ضرر قابل توجهی از نیاز به شناور فعال رنج می‌برد، که گیر کردن آن در محیط‌های خاص مانند مایع گلآلود آسان است.

سنسور سطح مایع فشار دیفرانسیلی، که فشار استاتیک تولید شده توسط ستون مایع با سطح مایع مطابقت دارد، به دلیل ویژگیهای عملکرد پایدار، دقت بالا و کم هزینه و غیره، پرکاربردترین سنسورهای سطح مایع است، با این وجود، فشار دیفرانسیل سنسور سطح مایع دارای اشکالاتی از جمله مسدود شدن یا مسدود شدن است، حتی منجر به اندازه‌گیری بی اعتبار بودن در محیط‌های پیچیده می‌شود.

سنسور سطح مایع فیبر نوری مزایای جذابی از تداخل ضدالکترومغناطیسی، قابلیت‌های مالتی پلکس، پاسخ سریع و مقاومت نسبت به محیط‌های سخت را نشان می‌دهد و معمولاً برای اندازه‌گیری سطح مایع در محیط‌های قابل اشتعال و منفجره مناسب به نظر می‌رسد، با این حال، آنها خالی از نقص نیستند. نقص به عنوان مثال، سنسورهای فیبر نوری قادر به اندازه‌گیری سطح مایع گلآلود و مایعات دیگر با مواد چسبنده نیستند، که ممکن است به سطح پرتاب سنجش بچسبند.

حسگرهای خازنی به دلیل مزایای چشمگیر از جمله کم هزینه بودن، خطی بودن زیاد، اتلاف انرژی کم و قابلیت تنظیم آسان هندسه برنامه، بیش از سایر سنسورهای موجود در زمینه سنسورهای سطح مایع الکتریکی رایج هستند. به همین دلیل، سنسورهای خازنی به طور گسترده‌ای در اندازه‌گیری سطح مایع مورد استفاده قرار می‌گیرند زیرا حساسیت بسیار خوبی در آب دارند. متأسفانه، به دلیل ساختار پیچیده و ایمنی غیرذاتی، سنسورهای سطح مایع خازنی که در حال حاضر استفاده می‌شوند، در محیط‌های احتمالی قابل اشتعال یا مواد منفجره کاربرد محدودی دارند. به طور خلاصه، وضعیت انواع سنسورها در جدول زیر نشان داده شده است:

## کلیات

جدول ۱: مقایسه مزایا و معایب انواع حسگرهای اندازه‌گیری سطح

حسگر	مزایا	معایب
شناوری	ساختار ساده	مستعد آسیب‌های مکانیکی
	هزینه کم	هزینه تعمیر و نگهداری بالا
	ساختار ساده	مستعد داشتن تداخلات
التراسونیک	نصب و نگهداری آسان	ایمنی ذاتی ضعیف
	دقت بالا	گیرکردن در محیط‌های خاص مانند
	ابعاد بزرگ	مایع گل‌آلود
مغناطیسی	امنیت بالا	
	عملکرد پایدار	مسدود شدن به آسانی
	دقت بالا	
دیفرانسیلی فشار	هزینه کم	
	ضد تداخلات الکترومغناطیسی	عدم اندازه‌گیری مایعات کدر و مواد
	استحکام در محیط‌های سخت	چسبنده
فیبر نوری	هزینه کم	ساختار پیچیده
	خطی بودن بالا	
	اتلاف انرژی کم	ایمنی غیر ذاتی
خازنی		

برای مثال یکی از پیچیده‌ترین و پرخطرترین محیط‌های اندازه‌گیری به طور کلی معادن هستند که شرایط بسیار خاصی برای اندازه‌گیری مایعات لازم است، فراهم شود. محیط اندازه‌گیری معدن ذغال‌سنگ زیرزمینی، که با وجود گازهای انفجاری و ذرات مانند متان و گرد و غبار مشخص می‌شود، بسیار پیچیده است. علاوه بر این، مایع اندازه‌گیری آب لجن است که حاوی مقدار زیادی پودر ذغال‌سنگ و خاک رس است. بنابراین، سنسورهای سطح مایع فوق به دلیل ویژگی‌های خاص خود، به سختی می‌توانند شرایط هیدرولوژیکی در زمان واقعی را با دقت در معدن ذغال سنگ زیرزمینی منعکس کنند. بنابراین، نیاز به یک سنسور سطح مایع کاملاً ذاتی و ایمن وجود دارد که ایمن، قابل اعتماد، دقیق، کم هزینه و به ویژه برای محیط‌هایی با شرایط پیچیده و خطرناک مناسب باشد.

یک حسگر با استفاده از فیبرهای نوری پلاستیکی برای اندازه‌گیری سطح ذاتی امن ساخته شده است. خطی بودن و وضوح حسگر قابل قبول است؛ با این حال، سنسور را نمی‌توان برای اندازه‌گیری سطح مایع گل‌آلود و سایر مایعات با ماده چسبنده استفاده کرد، علاوه بر این، نتایج اندازه‌گیری باید بیشتر بهبود یابد. یک سنسور سطح مایع فیبر نوری بهم پیوسته برای دستیابی به اندازه‌گیری ذاتی و ایمن سطح مایع در محیط‌های قابل اشتعال طراحی شده است. با این حال، در این سنسور مشکلاتی نیز وجود دارد، از جمله محدوده اندازه‌گیری باریک (۲۰ سانتی متر) و حساسیت به غوطه وری مایع. یک سیستم اندازه‌گیری و مانیتورینگ برای سطح آب مورد استفاده در معدن ذغال‌سنگ، که سیگنال فشار را به سیگنال فرکانس تبدیل می‌کند، پیشنهاد شده است. با این حال، سنسور به راحتی در مایع گل‌آلود گیر کرده یا مسدود می‌شود. اما به رغم تمام این مشکلات، سنسورهای خازنی در اندازه‌گیری سطح مایع توجه قابل توجهی را به خود جلب کرده‌اند. متأسفانه حسگرهای خازنی سطح مایعات که در حال حاضر استفاده می‌شوند نمی‌توانند نیاز به اندازه‌گیری سطح مایع را در محیط‌های قابل اشتعال و منفجره برآورده کنند.

بنابراین، پس از حل مسئله ایمنی ذاتی، طراحی سنجش خازنی هزینه ها را کاهش می دهد و ممکن است یک راه حل مفید برای اندازه گیری سطح مایع در محیط های قابل اشتعال و منفجره که شرایط محیطی خاصی دارند را فراهم کند. به طور کلی، مدار ذاتی ایمن برای دستگاهی که در محیط گازهای قابل اشتعال و مواد منفجره نصب شده ضروری است. مطابق استانداردهای ایمنی در اتمسفرهای انفجاری<sup>18</sup>، مدار ذاتی ایمن به این صورت تعریف می شود که قادر به آزاد کردن انرژی الکتریکی یا حرارتی کافی برای ایجاد اشتعال در مخلوط قابل اشتعال در صورت کار عادی یا در صورت کوتاه شدن یا آسیب دیدن یک قطعه نیست. از این رو، طراحی ذاتی و ایمن مدار نوعی طراحی کم توان است. جریان و ولتاژ در مدار در محدوده مجاز کاملاً محدود خواهد شد. [5]

---

<sup>18</sup> IEC 60079-0-2007

## ۱-۲-۱- حسگر خازنی

حسگرهای خازنی فقط در اندازه‌گیری ارتفاع سطح مایعات در مخازن کاربرد ندارند و دامنه وسیعی در سیستم‌های اندازه‌گیری دارند.

سنسورهای خازنی به صورت الکتریکی ظرفیت بین دو یا چند هادی را در یک محیط دی‌الکتریک، معمولاً هوا یا مایع اندازه‌گیری می‌کنند. یک روش مشابه اندازه‌گیری میدان الکتریکی است، جایی که میدان ولتاژ الکترواستاتیک تولید شده توسط هادی‌ها در یک محیط دی‌الکتریک توسط یک پراب و یک تقویت‌کننده امپدانس سطح بالا انتخاب می‌شود.

از شکل موج تحریک با فرکانس بالا معمولاً استفاده می‌شود، زیرا امپدانس واکنشی صفحات کوچک در هوا می‌تواند صدها مگاهم در فرکانس‌های صوتی باشد. فرکانس‌های تحریک ۱۰۰ کیلوهرتز یا بیشتر، امپدانس را به یک محدوده کیلواهم که به راحتی قابل کنترل است، کاهش می‌دهد.

برخی از سیستم‌ها از محیط به عنوان مسیر برگشتی برای جریان‌های خازنی استفاده می‌کنند. به عنوان مثال، یک فرد با چند صد پیکوفاراد<sup>۱۹</sup> به طور خازنی به ساختمان یا زمین متصل می‌شود. بیشتر اوقات، مسیر بازگشت یک سیم است.

دامنه کاربردها بسیار زیاد است. در انتهای کوچک، مدارهای مجتمع سیلیکونی از ظرفیت بین کانتینرهای سیلیکون میکروماشین برای اندازه‌گیری جابجایی‌های میکرومتر استفاده می‌کنند. ابعاد در مرتبه ۱۰۰ لام است و شکاف می‌تواند یک لام یا کمتر باشد. در انتهای بزرگ، پرسنل خازنی و ردیاب‌های خودرو ابعاد صفحه‌ای چند متری دارند. از سنسورهای خازنی برای سیگنال‌های نرخ ویدیو در یکی از فناوری‌های ذخیره اولیه دیسک ویدیو استفاده شده است.

بازار جهانی حسگرها بیش از ۲.۳ میلیارد دلار است که با نرخ سالانه ۱۰ درصد رشد می‌کند. محصولات مصرفی، از جمله سنسورهای تصویربرداری، ۶۴ درصد از بازار را تشکیل می‌دهند، شتاب‌سنج‌ها ۱۹ درصد و انواع مختلف سنسورهای تخصصی کل را تکمیل می‌کنند. [6]

فناوری سنسورها در حال انتقال آهسته از ابزارهای گنگ، گران و غیرقابل انعطاف، به واحدهای هوشمند، خود کالیبراسیون، مبتنی بر سیلیکون است و روش اندازه‌گیری انتخابی برای دستگاه‌های سیلیکون نیز همانند ابزارهای اندازه‌گیری گستته در حال حرکت است از انواع تکنولوژی‌های مبدل‌ها، مانند مغناطیسی، نوری و پیزوالکتریک، به خازنی. به طور کلی جهان در حال تغییر به سمت انواع حسگرهای خازنی است.

سنسورهای خازنی را می‌توان برای کاربردهای مختلف استفاده کرد. از سنسورهای ساده برای اندازه‌گیری ایستا و استاتیک مانند سطح مایع در مخازن استفاده می‌شود، جایی که توانایی آن‌ها در تشخیص وجود دی‌الکتریک یا هادی در فاصله باعث می‌شود از طریق یک مسیر غیررسانا کار کنند. دستگاه‌های مشابه می‌توانند گل‌میخ‌های چوبی را در پشت دیوارهای گچ پیدا کنند. دقیق

<sup>19</sup> picofarad

و خطی بودن آنالوگ بسیار بالا را می توان با سیستم‌های دو یا سه صفحه‌ای با ساختاری دقیق بدست آورد، یا می‌توان از هندسه‌های چند صفحه‌ای با مدارهای دیجیتال استفاده کرد تا دقت دیجیتال را جایگزین دقت آنالوگ کرد.



شکل ۷: نوعی حسگرخازنی [4]

سنسورهای خازنی برای اندازه‌گیری خصوصیات مواد نیز مفید هستند. مواد دارای مقادیر مختلف ثابت دیالکتریک و همچنین اتلاف دیالکتریک هستند و مقادیر هر دو ویژگی (به ویژه اتلاف دیالکتریک<sup>۲۰</sup>) با تغییر دما و فرکانس تغییر می‌کند تا یک پارامتر مشخصه را برای اندازه‌گیری از راه دور به ماده بدهد. در پیوست های منبع [6] مشخصات دیالکتریک مواد مختلف در برابر فرکانس ذکر شده است.

فناوری خازنی به ویژه برای یکپارچه سازی بسیار مفید است، زیرا در دما پایدار است و مشکلات ظرفیت خازنی غیر مطلوب، طول سرب و گره‌های با امپدانس بالا به راحتی بر روی تراشه سیلیکون کنترل می‌شود تا بر روی برد PC.

سنسورهای هوشمند با انجام کارهای سطح پایین مانند کالیبراسیون، خودآزمایی و جبران عوامل محیطی، ارزش خود را در سیستم افزایش می‌دهند. ضریب اندازه‌گیری سنسورهای هوشمند را می‌توان به طور خودکار مقیاس بندی کرد تا بتوان از یک نوع سنسور در بسیاری از مکان‌ها استفاده کرد، و نرم افزار ساکن سنسور می‌تواند با مدیریت انتهای یک گذرگاه داده سنسور به ارتباطات کمک کند.

اکثر سنسورها از اتصالات نقطه به نقطه با میزبان استفاده می‌کنند، با بسته شدن تماس یا سیگنال دیجیتال سطح TTL یا حلقه جریان ۴-۲۰ میلی آمپر یا سیگنال ولتاژ ۱-۵ ولت. همانطور که سنسورها در یک کاربرد استفاده می‌شوند، مشکل

<sup>20</sup> Loss tangent

سیم کشی و آزمایش سیستم‌های پیچیده، سبب استفاده از یک باس مشترک با سیم مشترک می‌شود. تلاش‌هایی در سطح بین‌المللی برای تحقیق و توسعه اینگونه باس‌های مشترک در حال انجام است.

در بخش زیر به برخی از کاربردهای حسگرهای خازنی در سیستم‌های اندازه‌گیری اشاره می‌شود:

- حسگرهای مجاورت: تشخیص خودرو، سوییج نور
- حسگرهای اندازه‌گیری: جریان، فشار، سطح، حجم، ضخامت، زاویه، بالانس
- حسگرهای سوییج: کمنور شدن لامپ، سوییج محدود (مانند حسگرهای دنده‌عقب خودروها)
- ارتباطات: استفاده در مودم‌های وایرلس
- گرافیگ کامپیوتری

حال که بررسی شد حسگر خازنی چیست در قسمت بعد به بیان مساله پژوهه پرداخته خواهد شد.

## ۱-۲-۲- بیان مساله

همان طور که قبیل تر انواع روش های اندازه گیری ارتفاع سطح مایعات در مخازن و انتخاب نوع خازنی آن به عنوان یک روش اینمن و دقیق و ارزان قیمت بررسی شد؛ حال به تشریح مساله مورد مطروحه پرداخته خواهد شد.

در این پژوهه هدف طراحی و ساخت یک سنسور خازنی سنجش ارتفاع سطح آب در یک مخزن ۶ متری می باشد.

این حسگر دارای یک کابل کواکسیال<sup>۲۱</sup> با پوشش PVC می باشد که به طول ارتفاع مخزن مورد هدف، در مخزن غوطه ور می شود. این کابل با ساختار منحصر به فرد خود که در فصل آینده تشریح خواهد شد، همانند یک خازن به همراه ماده دی الکتریک مابین دو صفحه خود عمل خواهد کرد. دیگر اجزای این حسگر شامل کیس حسگر و برد الکترونیکی و درگاه ارتباط با کامپیوتر می باشد که همگی درون کیس محافظت در بالا مخزن نصب می شود. برد الکترونیکی دارای یک مدار آنالوگ و یک مدار دیجیتال می باشد. در مدار آنالوگ تغییرات خازن ساخته شده بوسیله کابل تبدیل به داده دیجیتال شده و به ریز پردازنده داده می شود تا مورد عملیات واقع شود و ارتفاع آب درون مخازن ثبت شود. پس آن از طریق ارتباط سریال به کامپیوتر منتقل می شود و عملیات مانیتورینگ انجام می پذیرد.

پس از برقراری جریان در مدار، در عمل کابل کواکسیال یک خازن الکتریکی می سازد. که تشریح این مساله در فصل آینده بیان خواهد شد. وقتی که سیال وارد مخزن شود، کم کم ارتفاع سیال در مخزن بالا آمده و ظرفیت این خازن بر اساس تئوری موجود افزایش خواهد یافت. ظرفیت خازن با استفاده از یک مدار الکتریکی آنالوگ به داده دیجیتال تبدیل می شود. سیگنال دیجیتال نیز وارد مدار دیجیتال (پردازشگر) می شود و از این به بعد به طور پیوسته عملیات پردازش به روی داده ورودی توسط پردازشگر (ریز پردازنده) انجام می پذیرد.

پس از پردازش داده و انجام عملیات های آماری روی داده، ارتفاع لحظه ای سیال در مخزن بدست می آید. البته می توان امکانات دیگری نیز مانند هشدار دادن در ارتفاعی خاص، اندازه گیری دما و غیره نیز به سیستم اضافه کرد. پردازشگر توسط ارتباط سریال، با یک نرم افزار کامپیوتری یا تلفن همراه به طور دائم در ارتباط است و عملیات مانیتورینگ مخزن با استفاده از این نرم افزار انجام می پذیرد که در فصل آینده جزئیات این نرم افزار نیز تشریح خواهد شد.



شکل ۸: نمونه ای از حسگرهای خازنی محصول شرکت [7] Endress

<sup>21</sup> Coaxial

### ۳-۱- اهمیت پروژه

در قسمت‌های قبل بر اهمیت و جایگاه سیستم‌های اندازه‌گیری در جهان پیرامون اشاره شد. همچنین اندازه‌گیری سطح مایعات در مخازن به عنوان یک مساله مهم در دنیا اندازه‌گیری و ابزار دقیق مطرح شد و به جایگاه مهم این دسته از حسگرها اشاره شد.

پیشرفت علم و تکنولوژی مستلزم پیشرفت همزمان روش‌های اندازه‌گیری است. همراه پیشرفت علوم، پدیده‌ها و معاملات جدیدی کشف می‌شود و این پیشرفت‌ها استفاده از روش‌های اندازه‌گیری جدیدی را ضروری می‌سازد. علوم جدید اگر با اندازه‌گیری‌های عملی پشتیبانی نشوند، ارزش عملی ندارند.

در صنعت نیز همراه بودن با پیشرفت علم بسیار حیاتی است. از این رو اندازه‌گیری‌های عملی، که جنبه اعتباردادن به علوم را دارند، در صنعت اهمیتی دوچندان پیدا می‌کنند.

اندازه‌گیری ارتفاع مایعات در مخازن از مهم‌ترین مباحث در صنایع هستند. اندازه‌گیری سریع و دقیق ارتفاع مایعات (حجم) در مخزن در صنایع پتروشیمی، پالیشگاه‌ها، نیروگاه‌ها، صنایع خودروسازی، دستگاه‌های سانتریفیوژ و غیره، اهمیت به‌سزایی دارد.

از دیگر مسائل مهم در ساخت چنین حسگرهایی بحث بومی‌سازی و بی‌نیازی صنایع کشور از واردات است. ساخت چنین حسگری با ویژگی‌های مورد نظر صنایع مختلف، منجر به پیشرفت و اعتبار بیشتر صنعت ابزار دقیق در کشور می‌شود. بومی‌سازی این حسگرها سبب شده داده‌های برداشت شده دقیق‌تر و مطابقت بیشتری با صنایع مختلف کشور داشته باشد. در بخش آینده مروری بر شرکت‌های بزرگ ساخت حسگرهای خازنی سنجش سطح مایعات در جهان انجام خواهد شد تا داخلی‌سازی این نوع حسگرها بیش از پیش مشخص شود.

البته از نگاه اقتصادی نیز نباید غفلت کرد زیرا با ساخت چنین سنسورهایی در داخل کشور، که اغلب از کشورهای پیشرفت‌هه وارد می‌شود، هم به استغالت کشور کمک می‌شود و هم با جلوگیری از واردات موجب کاهش خروج ارز از کشور می‌شود و تولید ناخالص داخلی کشور را افزایش می‌دهد. همچنین هزینه کردن در بخش تحقیق و توسعه صنعت ابزار دقیق موجب می‌شود در بلند مدت کشور در این صنعت مهم خودکفا شده و حتی به صادرات هم برسد. صنعت ابزار دقیق تقریباً در تمام صنایع کشور تاثیرگذار است و در صورت پیشرفت در این صنعت، به طور قطع روی صنایع و تکنولوژی‌های وابسته اثر خود را نشان خواهدداد.

از اهداف پروژه، جدا از اهمیت تحقیق بر حوزه ابزار دقیق و بومی‌سازی این صنعت، می‌توان به دستیابی به دقت و سرعت در پاسخ مناسب‌تر نسبت به نمونه‌های داخلی اشاره کرد. البته همان‌طور که در بخش‌های بعدی بررسی خواهد شد، این نوع از حسگرها، یعنی حسگرهای سطح‌سنج خازنی، رونق آنچنانی در میان شرکت‌های تولید کننده تجهیزات ابزار دقیق داخلی ندارد و شرکت‌های محدودی اقدام به ساخت چنین حسگرهایی می‌کنند و در صنایع از حسگرهای خارجی استفاده می‌شود؛ پس فعالیت در این حوزه و ساخت چنین حسگرهایی به‌خودی خود حوزه‌ای بسیار بکر می‌باشد. همچنین در نمونه‌های داخلی برای مخازن با ارتفاع بالا (۳ متر به بالا) دقت این حسگر بسیار کاهش یافته است. یکی دیگر از اهداف ما رسیدن به دقت مناسب برای اندازه‌گیری آب در مخزن ۶ متری است که رسیدن به این مهم نیازمند طراحی ویژه‌ای است که در فصل بعدی بررسی خواهد شد.

## ۴-۱- پیشینه پژوهش

ساخت حسگرهای خازنی سنجش ارتفاع مخازن موضوعی نو و بدیع نیست که برای اولین بار مورد پژوهش واقع شده باشد؛ بلکه چندین کمپانی خارجی و داخلی حسگرهای خازنی مورد نظر را می‌سازند و به فروش می‌رسانند. در ادامه مرواری بر شرکت‌های مطرح ساخت چنین حسگرهایی در سطح بین‌المللی و داخلی خواهد شد.

### ۱-۴-۱- شرکت‌های خارجی

شرکت‌های خارجی ساخت حسگر اغلب جزو کمپانی‌های بالارزش مالی بالا هستند. بدلیل اهمیت و فناوری بالا سیستم‌های اندازه‌گیری این مساله دور از ذهن نیست. در این بخش مرواری بر چندی از این کمپانی‌ها خواهد شد و بطور خلاصه با محصولات آن‌ها در حوزه اندازه‌گیری سطح مایعات در مخازن آشناشی پیدا خواهد شد.

#### ۱-۱-۴-۱- شرکت Endress + Hauser

نام این شرکت Endress + Hauser است. این کمپانی تأمین‌کننده ابزار و اتوماسیون آزمایشگاهی در سطح جهانی مستقر در سوئیس است. در سال ۲۰۱۸، این شرکت خانوادگی فروش خالص ۲.۴۵۵ میلیارد یورو ایجاد کرد، درآمد خالص ۲۳۲.۲ میلیون یورو را ثبت کرد و ۱۳۹۲۸ کارمند در سراسر جهان استخدام کرد. این شرکت ۳ نوع حسگر خازنی سنجش ارتفاع دارد که در جدول ۲ مورد بررسی قرار گرفتند. البته بعضی از مدل‌های این شرکت، حسگرهای چندگانه‌ای که قابلیت اندازه‌گیری ارتفاع، فشار و جریان مایعات درون مخزن را دارند، هستند که مورد بحث نیستند.

جدول ۲: مقایسه انواع مدل‌های شرکت [7] Endress

نام مدل	قیمت	دقت	حد اندازه‌گیری	جنس	عکس
FMI 51	1140 \$	0.1 %	0.1 – 4 m	تفلون	A
FMI 21	540 \$	1 %	2.5 m	فیبر کربن	B
FMI 52	700 \$	0.1 %	0.42 – 10 m	FEP	C



شکل ۹: تصاویر از انواع مدل‌های حسگرهای شرکت [7] Endress

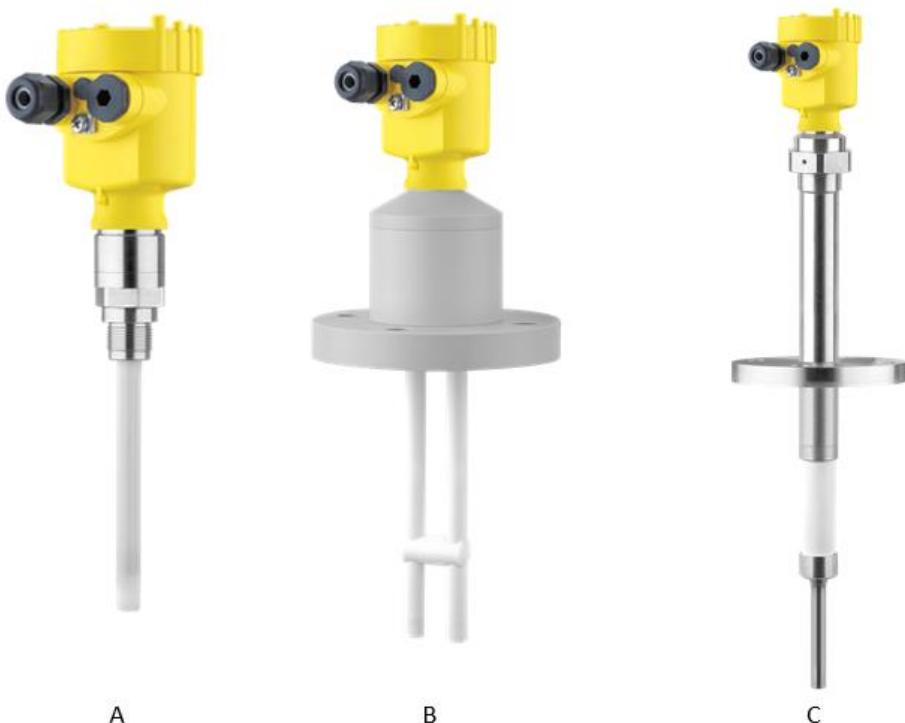
## ۲-۱-۴-۱ - شرکت Vega

شرکت VEGA Grieshaber یک تولیدکننده بینالمللی سنسور برای اندازه‌گیری سطح و فشار در فرایندهای تولیدی صنعتی است. این شرکت در آلمان مستقر است اما در بیش از ۸۰ کشور با شرکت‌های تابعه و شریک فروش فعال است و بیش از ۱۶۰۰ نفر را در سراسر جهان استخدام می‌کند که ۷۷۲ نفر از آنها در دفتر مرکزی در آلمان هستند. این شرکت در ۶۰ سال گذشته تحولات بسیاری در مسیر اندازه‌گیری بوجود آورده است. گردش مالی سالانه حدود ۴۵۳ میلیون یورو است. [8]

شرکت Vega محصولات متنوعی در حوزه حسگرهای خازنی اندازه‌گیری سطح دارد. اما اختلافات جزئی و بیشتر در محل مورد استفاده سنسور تفاوت دارند. برای مثال ۳ مدل از انواع این سنسورها مقایسه شده است

جدول ۳: مقایسه چند مدل از حسگرهای شرکت Vega [8]

نام مدل	قیمت	دقت	حد اندازه‌گیری	جنس	عکس
Vegacal 64	1270 \$	0.1 %	4 m	تفلون	A
Vegacal 69	940 \$	1 %	6 m	تفلون	B
Vegacal 67	1350 \$	1 %	40 m	سرامیک	C



شکل ۱۰: تصاویر از انواع حسگرهای شرکت Vega [8]

**Siemens ۱-۴-۳- شرکت**

شرکت چند ملیتی مهندسی زیمنس که مرکز آن در مونیخ، آلمان است از بزرگترین شرکت‌های اروپا تولیدکنندهٔ تجهیزات و ابزار الکترونیک و برق صنعتی و همچنین ابزار دقیق می‌باشد. زیمنس دامنه‌ی گسترده‌ای از محصولات و خدمات مربوط به مهندسی برق و الکترونیک را ارائه می‌دهد. یکی از حوزه‌های فعالیتی زیمنس، درایوها، اتوماسیون و محصولات مربوط به کارخانه‌های صنعتی زیمنس می‌باشد که شامل محصولاتی چون موتورها و درایوهاست. تسممه‌های نقاله، پمپ‌ها و کمپرسورها، اجزای مکانیکی شامل چرخدنده برای توربین‌های بادی و کارخانه‌های سیمان، تجهیزات و سامانه‌های اتوماسیون و کنترل‌ها برای ماشین‌آلات تولیدی و ابزارآلات و کارخانه صنعتی برای فرآوری آب و فرآوری مواد اولیه می‌شود.

شرکت زیمنس محصولات متعددی در حوزهٔ حسگر سطح‌سنج دارد که می‌توان از آن‌ها به سری SITRANS LC300 اشاره کرد. در جدول زیر مشخصات دو مدل از این سری آورده شده است:

جدول ۴: مقایسه دو مدل از حسگر شرکت زیمنس [9]

نام مدل	قیمت	دقت	حد اندازه‌گیری	جنس	عکس
7ML5670	2900 \$	0.5 %	0.3 - 5 m	استیل	A
7ML5673	1780 \$	0.5 %	1 - 25 m	استیل	B



شکل ۱۱: نمونه‌ای از محصولات شرکت زیمنس [9]

شکل سمت راست: A - شکل سمت چپ: B

## ۱-۴-۲- شرکت‌های داخلی

در داخل ایران نیز شرکت‌هایی در حوزه ابزار دقیق مشغول به فعالیت هستند. پس از بررسی‌های فراوان دریافت که فقط دو شرکت در حوزه تجهیزات سطح‌سنج فعالیت می‌کنند. البته اسامی مختلفی از شرکت‌های ایرانی تولیدکننده در بازار موجود است اما اکثر آن‌ها یا صرفاً واردکننده از شرکت‌های چینی و تایوانی هستند و یا محصولاتی بدون کیفیت تولید می‌کنند.

دو شرکتی که در این حوزه بررسی شد:

## ۱-۴-۲-۱- شرکت تبریزپژوه

شرکت تبریزپژوه در سال ۱۳۶۷ تأسیس و در سال ۱۳۷۴ به عنوان اولین تولیدکننده‌ی انواع سنسورهای صنعتی در ایران، اقدام به تولید سنسورهای بدون تماس شامل سنسورهای القایی، خازنی، نوری، مغناطیسی، کنترل سطح خازنی، مغناطیسی، نوری با خروجی سوئیچ و آنالوگ و... با رعایت آخرین استانداردهای بین‌المللی نمود و در این راه توانست گامی هرچند کوچک در جهت خودکفایی صنعت کشور بردارد.

این شرکت حسگرهای سطح سنج خازنی با خروجی رله یا پیوسته، مطابق با نیاز مشتری تولید می‌کند. ویژگی‌های دو مدل قابل سفارش از این شرکت در جدول زیر آورده شده است:

جدول ۵: مقایسه دو مدل از محصولات شرکت تبریز پژوه

جدول ۵: مقایسه دو مدل از محصولات شرکت تبریز پژوه						
	نام مدل	قیمت	دقت	حد اندازه‌گیری	جنس	عکس
A	Rode type	80,000,000 IRR	5 %	10 m	سیم بکسل	
A	Rope type	57,000,000 IRR	5 %	0.3 m	استیل با PTFE	



شکل ۱۲: حسگر سطح‌سنج محصول شرکت تبریز پژوه [23]

#### ۱-۴-۲-۲-۴-۱- شرکت پارس ارجین دانش

شرکت دانش بنیان پارس ارجین دانش با توجه به نیازهای حساس صنعت کشور و با تکیه بر دانش و تجربه متخصصین خود، موفق به طراحی و ساخت سنسورهای خازنی فرکانسی سطح سنج مخازن برای مواد جامد فله و مایعات مورد استفاده در صنایع سبک و سنگین شده است. این مجموعه در سال ۱۳۹۸ به عنوان اولین شرکت دانش بنیان در شاخه طراحی سنسورهای لول سوئیچ پذیرفته گردید و تحت برنند تجاری پاد فروش محصولات خود را آغاز نمود. در حال حاضر این شرکت توانایی ساخت بیش از سی نوع از این لول سوئیچ با مشخصات منحصر بفرد را دارد.

جدول ۶: مقایسه دو محصول شرکت پارس ارجین دانش

نام مدل	قیمت	دقت	حد اندازه‌گیری	جنس	عکس
PCS550	48,000,000 IRR	1 %	1 m	پلی‌اتیلن	A
PCS550	78,000,000 IRR	5 %	5 m	سیم بکسل	B



شکل ۳: حسگرهای ساخت شرکت پارس ارجین دانش

شکل سمت راست: A - شکل سمت چپ: B



## **فصل ۲-روش انجام پروژه**

## ۱-۲ - مقدمه

در این فصل به تشریح روش انجام پروژه پرداخته خواهد شد. ابتدا با استفاده از بلوك دیاگرام زیر مسیر کلی حسگر را بیان کرده و سپس در بخش‌های بعدی جزئیات هر قسمت را به طور کامل توضیح خواهیم داد.



شکل ۱۴: دیاگرام بلوکی کلی حسگر

در دیاگرام بالا، اجزای مختلف این حسگر مشخص شده است. هنگامی که مایع مورد نظر(آب) وارد مخزن شود. تغییر ارتفاع آب در مخزن سبب می‌شود که ظرفیت خازن تشکیل شده با کابل کواکسیال تغییر کند و افزایش پیدا کند. تشریح فرمول‌های این تغییر در بخش‌های آینده انجام خواهد شد. پس از تغییر ظرفیت خازن، دو ترمینال این خازن به مدار آنالوگی وصل می‌شود که با تغییر ظرفیت خازن یک پالس مربعی شکل با فرکانس متغیر ایجاد می‌کند. مدار اسیلاتور تایمر ۵۵۵ در مدار آنالوگ استفاده شده است که در بخش مربوطه مفصل بحث خواهد شد. پس از تولید یک پالس مربعی در مدار آنالوگ این پالس به میکروکنترلر داده می‌شود. در میکروکنترلر با تشخیص فرکانس پالس ورودی، پس پردازش این پالس، ظرفیت خازن تشکیل شده در مدار آنالوگ بدست خواهد آمد. که با استفاده از معادلات ریاضی، ارتفاع آب درون مخزن با استفاده از ظرفیت این خازن محاسبه می‌شود. در میکروکنترلر با استفاده از عملیات‌های ریاضی و کالیبراسیون سعی بر افزایش دقت داده خروجی از میکرو خواهد شد. پس از بدست آمدن ارتفاع آب درون مخزن، ۳ مسیر در پیش است. اول آنکه با استفاده از یک نرم افزار کامپیوترا و تلفن‌همراه، قابلیت مانیتورینگ مداوم این سطح فراهم شود و بین میکرو و کامپیوترا با استفاده از درگاه ارتباطی سریال اتصال برقرار شود. دوم آنکه این ارتفاع را به نمایشگر موجود بر بدن حسگر انتقال داده شود تا این داده بطور مداوم نمایش داده شود. سوم آنکه در صورت نیاز دستوراتی به عملگرهای موجود در سیستم داده شود تا تغییراتی را در صورت نیاز اعمال کنند مثلًا در صورتی که ارتفاع سطح آب از حدی بالاتر رفت، هشدار بدهد و یا با استفاده از شیر برقی ورودی آب به مخزن را قطع کند که البته این مساله در حوزه کارکرد این پروژه نیست.

به طور کلی می‌توان طراحی و ساخت این حسگر را به ۴ بخش: ساختار مکانیکی، طراحی برد<sup>۲۲</sup> الکترونیکی، برنامه‌نویسی میکروکنترلر و نرم‌افزار مانیتورینگ تقسیم کرد. البته یکی از مهم‌ترین بخش‌های هر سنسور بحث کالیبراسیون آن است که در فصل نتایج مورد بررسی قرار خواهد گرفت.

<sup>22</sup> PCB

## ۲-۲- ساختار مکانیکی

در حسگر سطح سنج مورد نظر، که دارای اینمی ذاتی و دقیق کافی باشد، کابل کواکسیال بی‌وی‌سی<sup>۲۳</sup> به عنوان عنصر حساس و سازنده خازن انتخاب شده است. با توجه به مزایای برجسته، قابلیت پردازش مواد، پایداری حرارتی و ارزش مادی، PVC یکی از پرکاربردترین مواد عایق برای سیستم‌های دارای کابل و سیم بوده است. [10]

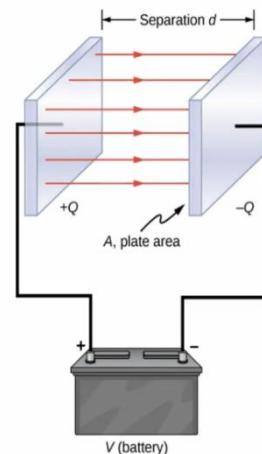
اما انتخاب کابل کواکسیال و این مدل از ساختار مکانیکی به همین راحتی نبود. طرح‌های دیگری نیز طراحی و پیاده‌سازی شدند ولی نتایج دلخواه حاصل نشد تا سرانجام این گزینه انتخاب شد. ابتدا مروری بر ساختار و معادلات حاکم بر حسگرهای خازنی انجام خواهیم داد و سپس مسیر طی شده برای رسیدن به این پیکربندی بررسی خواهد شد.

## ۲-۲-۱- معادلات حاکم بر حسگر خازنی

روش‌های مختلفی برای ساخت خازن وجود دارد مانند دو صفحه موازی، دیسک، یک کره، دو کره کنارهم، استوانه‌ای، سیلندری و غیره اما دو نوع دو صفحه موازی که به خازن تخت معروف است و خازن استوانه‌ای از بقیه رایج‌تر هستند. ابتدا معادلات دو نوع خازن تخت و استوانه‌ای مرور خواهد شد.



شکل ۱۵: شماتیک خازن تخت



شکل ۱۶: خازن تخت [6]

ظرفیت خازن تخت به شکل زیر محاسبه می‌شود:

$$C = \frac{\epsilon_0 \epsilon_r A}{d}$$

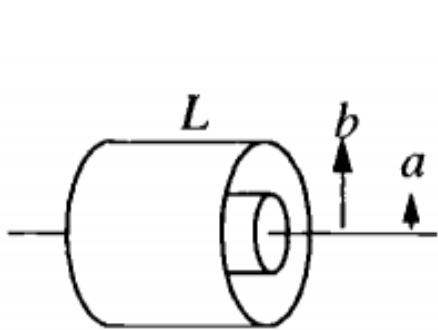
معادله ۱: ظرفیت خازن تخت

که در آن برقرار است:

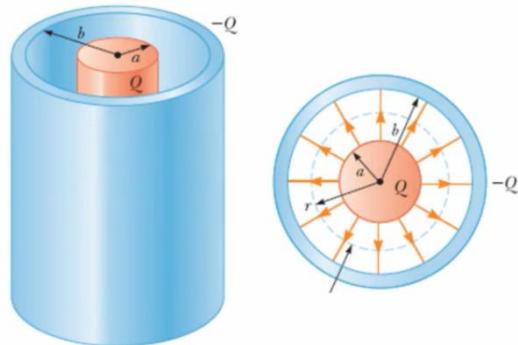
$C$  برابر ظرفیت خازن به فاراد<sup>۲۴</sup>،  $\epsilon_0$  برابر ثابت دیالکتریک نسبی که برای هر ماده متفاوت است؛  $A$  برابر مساحت صفحات تخت بر حسب مترمربع،  $d$  برابر فاصله دو صفحه موازی از یکدیگر به متر

<sup>23</sup> PVC Coaxial cable

<sup>24</sup> Farad



شکل ۱۷: شماتیک خازن استوانه‌ای



شکل ۱۸: خازن استوانه‌ای [6]

ظرفیت خازن استوانه‌ای بشکل زیر محاسبه می‌شود:

$$C = \frac{2\pi\epsilon_0\epsilon_r}{\ln \frac{b}{a}} L$$

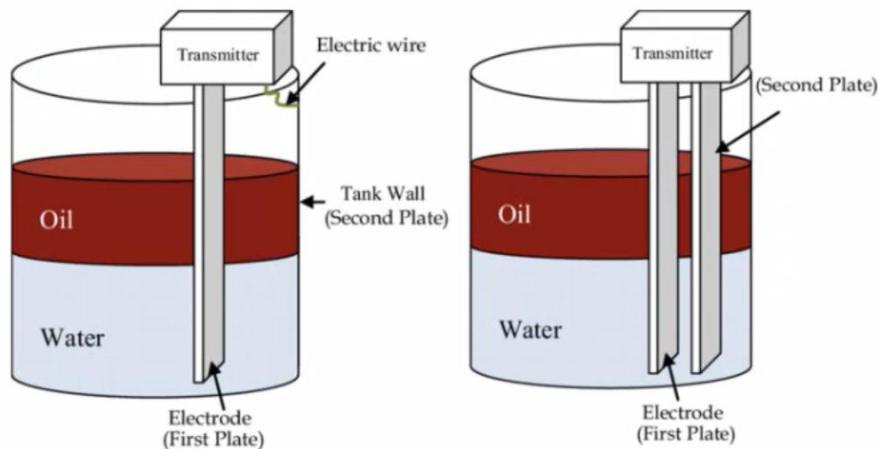
معادله ۲: ظرفیت خازن استوانه‌ای

که در آن برقرار است:

$C$  برابر ظرفیت خازن به فاراد،  $\epsilon_0 = 8.854 \times 10^{-12}$  برابر ثابت دیالکتریک نسبی که برای هر ماده متفاوت است؛  $L$  برابر طول استوانه‌ها،  $a$  برابر شعاع استوانه‌ی داخلی و  $b$  برابر شعاع استوانه‌ی خارجی. البته همان طور که در شکل ۱۸ مشاهده می‌کنید معمولاً از یک میل‌گرد و یک سیلندر برای ساخت چنین خازن‌هایی استفاده می‌شود که  $a$  شعاع میل‌گرد و  $b$  شعاع داخلی سیلندر می‌باشد.

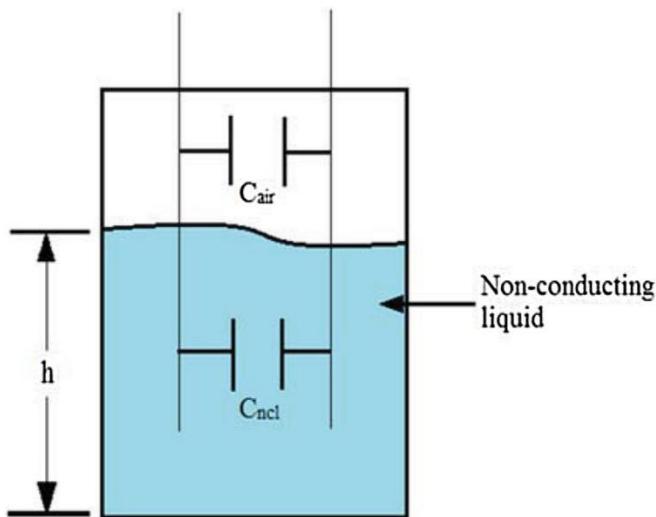
## ۲-۲-۲- پیکربندی حسگر خازنی

برای ساخت این دو مدل خازن در مخازن به توجه به ماده داخل مخزن و جنس مخزن و پارامترهای دیگر، پیکربندی‌های مختلفی وجود دارد. در حالتی که از قصد استفاده از خازن تخت وجود داشته باشد می‌شود از در دو حالت دو پراب و تک پраб استفاده کرد.



شکل ۱۹: پیکربندی‌های مختلف خازن تخت [4]

در حالت سمت راست که همان حالت دو پراب هست با استفاده از دو صفحه تخت خازن ساخته شده است. با اتصال دو صفحه آلمینیومی به حسگر و ایجاد اختلاف ولتاژ، میدان الکتریکی تشکیل و خازن ساخته می‌شود. در ابتدا که مخزن خالی است، ماده‌ی دی‌الکتریک مابین دو صفحه هوا است و از ضریب دی‌الکتریک نسبی  $^{25} E_r$  مربوطه در فرمول استفاده می‌شود. با ورود مایع به مخزن مثلاً آب، در قسمتی از دو صفحه ماده دی‌الکتریک مابین تغییر کرده و یک خازن جدید با ضریب دی‌الکتریک نسبی



شکل ۲۰: شماتیک پیکربندی حسگر با خازن تخت [19]

<sup>25</sup>  $E_r$

جدید تشکیل می‌شود. حال اگر مانند شکل بالا مایعی دیگر مانند روغن نیز به مخزن اضافه شود، این ماده خازنی جدید با ضریب دیالکتریک مربوط به روغن تشکیل می‌شود.

در شکل ۲۰ این پیکربندی مشخص است با بالا آمدن سطح مایع درون مخزن دو خازن موازی تشکیل می‌شود که ماده دیالکتریک مابین آن متفاوت است. نکته‌ای که حائز اهمیت است آن است که در این مرحله رسانایی مایع درون مخزن اهیمتی ندارد و آینده بیشتر بحث خواهد شد.

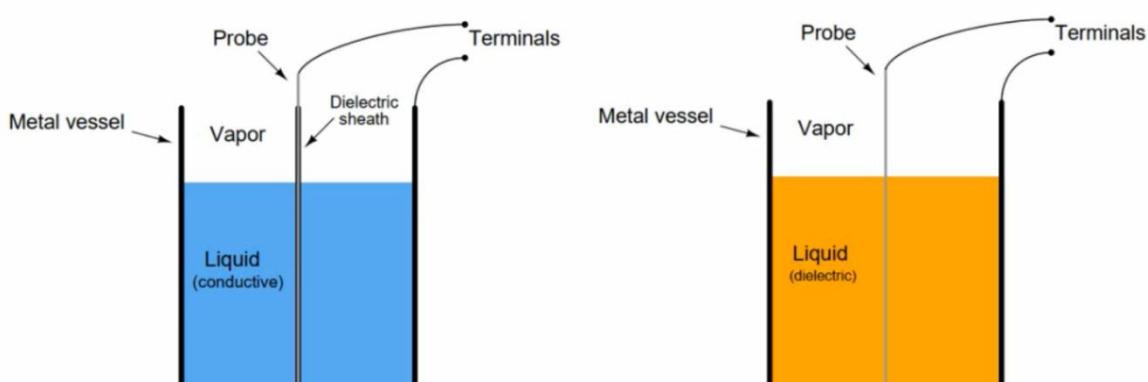
اما پیکربندی دیگر که در شکل ۱۹ مشخص است، استفاده از یک پراب برای ساخت خازن تخت است. در این حالت یک صفحه آلومینیومی درون مخزن قرار می‌گیرد و صفحه دیگر خازن، دیواره مخزن می‌شود. در این حالت باید جنس دیواره مخزن رسانا باشد تا یکی از ترمینال‌های تغذیه با سیم به این دیواره وصل شود و میدان الکتریکی تشکیل شود. در حقیقت در حالت خالی مخزن، یک خازن بین صفحه‌ی فلزی و دیواره مخزن رسانا با دیالکتریک هوا تشکیل می‌شود؛ پس از بالا آمدن آب درون مخزن، یک خازن جدید موازی با خازن قبلی تشکیل می‌شود که دیالکتریک آن آب است و ظرفیت خازن تغییر قابل توجهی کرده و سطح آب قابل اندازه‌گیری می‌شود.

الزام به اینکه مخزن رسانا باشد و از جنس خاصی باشد یک پارامتر محدود کننده است که مطلوب استفاده‌کنندگان این نوع حسگرهای نیست، همین موضوع سبب می‌شود پیکربندی تک پраб، مطلوب ما نباشد. البته در بخش‌های بعدی مروری بر مسیر طی شده برای ساخت چنین پیکربندی خواهد شد.

حال به بررسی پیکربندی‌های خازن‌های استوانه‌ای پرداخته خواهد شد:

در حالتی که دو استوانه درون هم قرار بگیرند مانند شکل ۱۸، و مایع مورد نظر هنگام افزایش ارتفاع درون مخزن، مابین این دو استوانه قرار بگیرد، این پیکربندی مانند حالت دو پраб با خازن تخت می‌باشد. این پیکربندی معمولاً مورد استفاده واقع نمی‌شود و معمولاً از پیکربندی تک پраб استفاده می‌شود در این حالت الزاماً باید شکل هندسی مخزن به صورت استوانه باشد و از جنس رسانا باشد تا فرمول‌ها در این پیکربندی صدق کند. داشتن دو پارامتر محدود کننده، استفاده از این نوع پیکربندی را نیز غیرمحبوب می‌کند.

اما یک نکته بسیار مهم آن است که مایعی همچون آب با ضریب دیالکتریک نسبی ۸۰، نسبت به هوا به ضریب ۱ تقریباً رسانا محسوب می‌شود و اصولاً تشکیل شدن خازن با استفاده از ماده دیالکتریک آب با خطای بسیاری همراه هست و به عبارتی اصلاً خازنی تشکیل نمی‌شود. برای حل این مشکل راه حلی وجود دارد و آن استفاده از یک ماده عایق بین پраб و آب است. در حالت اصطلاحاً بجای استفاده از Bare Probe از Insulated Probe استفاده خواهد شد.



شکل ۲۱: پیکربندی خازن با دو مایع متفاوت [12]

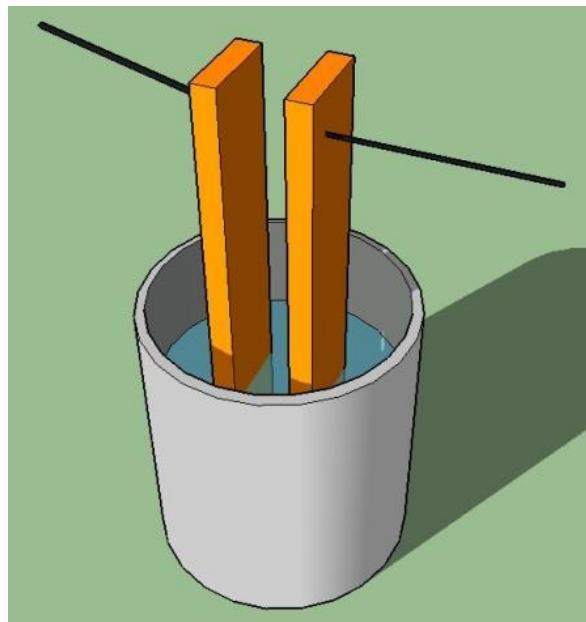
همانطور در شکل بالا دیده می‌شود برای مایعات رسانا مانند آب از پراب با لایه محافظ استفاده شده است. در حقیقت این پрабها با یک لاله از مواد عایق پوشیده شده‌اند تا نقش دیالکتریک را ایفا کنند و در صورت وصل کردن دیواره‌ی رسانا مخزن به جریان، دیواره‌ی مخزن به همراه آب (رسانا) یک سمت خازن و سمت دیگر خازن را پراب محافظت شده تشکیل می‌دهند. فرقی در این نوع پیکربندی با حالت دیگر هست آن است که ضریب دیالکتریک ثابت است و این  $L$ . طول خازن استوانه‌ای است که تغییر می‌کند و هرچه قدر که مایع در مخزن بالا آید، ظرفیت خازن به همان نسبت افزایش پیدا می‌کند.

مشکلی که هنوز در این نوع پیکربندی نیز پابرجا است الزام به استفاده از مخزن با دیواره رسانا است که این پارامتر به عنوان پارامتر محدود کننده همچنان مطرح است.

در بخش بعدی مسیری که طی شد تا پیکربندی مناسب برای ساخت این حسگر انتخاب شود، بیان می‌شود.

### ۲-۳-۲- پیدا کردن پیکربندی مناسب

در ابتدا سعی بر این بود که با الهام از [11] یک پیکربندی مناسب اجرا شود.



شکل ۲۲: پیکربندی یک نوع حسگر سطح سنج مایعات [11]

در این پیکربندی از دو صفحه مسی استفاده شده تا نقش دو طرف میدان الکتریکی در یک خازن را بازی کنند. این پیکربندی توجهی به رسانا بودن مایع آب نکرده است و آن را در نقش دی الکتریک درنظر گرفته است. همین سبب می شود از دقت و صحت کافی برخوردار نباشد. ایراد دیگری که این پیکربندی دارد آن است که در مخازن بزرگ، تهییه دو صفحه رسانا مرغوب (مس یا برنج) که بتواند دو قطب خازن را به خوبی تشکیل دهد، هزینه زیادی دارد که یک پارامتر محدود کننده است. این دو نکته سبب شد تا این نوع پیکربندی گذر کرده و دنبال پیکربندی تک پراب ایزوله<sup>۲۶</sup> رفته و آن پیکربندی پیاده سازی شود.

در پیکربندی تک پراب ایزوله از میله مسی به ارتفاع مخزن استفاده می شود که دور آن با تفلون<sup>۲۷</sup> ایزوله شده است.



شکل ۲۴: نمای پراب مسی

شکل ۲۴: پیکربندی خازن تک پراب همراه کیس محافظ

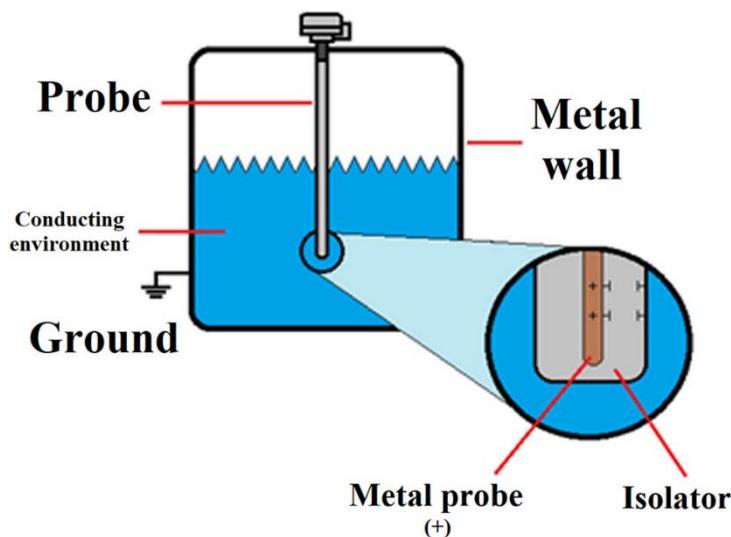
<sup>26</sup> Insulated Probe

<sup>27</sup> PTFE

همانطور که در شکل های بالا مشاهده می شود طرح CAD این حسگر در نرم افزار سالیدور کس طراحی شده است. در این طرح یک میله مسی به قطر ۱.۵ سانتی متر با یک لوله تفلونی از جنس PTFE ایزوله شده و به عنوان ترمینال اول خازن در نظر گرفته می شود و در سراسر ارتفاع مخزن قرار می گیرد. ترمینال دیگر خازن نیز دیواره مخزن در نظر گرفته می شود تا با رسانای آب خازن تشکیل شود. در این نوع پیکربندی لوله تفلونی و در حقیقت ماده PTFE به عنوان دی الکتریک در نظر گرفته می شود. با بالا آمدن سطح آب در مخزن بدلیل رسانا بودن آب بین دیواره مخزن و میله مخزن ایزوله شده، خازن تشکیل می شود.

این پیکربندی علیرغم آنکه مشکل رسانا بودن آب را حل می کند و خازن تشکیل می شود ولی همچنان دیگر پارامتر محدود کننده یعنی رسانا بودن مخزن بر قوت خود باقی است. این مساله اصلی ترین دلیل برای گذر از این نوع پیکربندی بود. دیگر دلیل برای گذر از این نوع پیکربندی، سختی در پیاده سازی این نوع است. قراردادن لوله تفلونی دور یک میله مسی نیازمند آن است که روش کوتینگ<sup>۲۸</sup> برای ایزوله کردن میله بکار گرفته شود. روش کوتینگ همانند همان کاری است که در ساخت قابلمه های تلفون انجام می شود. این روش با دستگاه های موجود در کارگاه معمولی نیازمند آن است که قطر میله میزبان دارای یک اندازه حداقلی باشد تا عملیات کوتینگ با دقت انجام شود و همچنین آنکه از چسب و رنگ کوره مابین تلفون و میل گرد استفاده می شود که سبب می شود ضریب دی الکتریک به راحتی قابل محاسبه نباشد.

بدلایلی که گفته شد هیچ کدام از این نوع پیکربندی ها مناسب نبودند و هر کدام معاوی بی در ساختار و اجرا داشتند؛ حال بعد از طی این مسیر به یک پیکربندی مناسب رسیده که هم مشکل رسانایی آب را حل می کند، احتیاجی به رسانا بودن مخزن ندارد، هزینه پیاده سازی آن سر سام آور نیست و همچنین بدلیل استفاده از خازن مرجع درون پیکربندی خود از دقت خوبی برخوردار است.



شکل ۲۵: شماتیک پیکربندی تک پراب همراه لوله PTFE [13]

<sup>28</sup> Coating

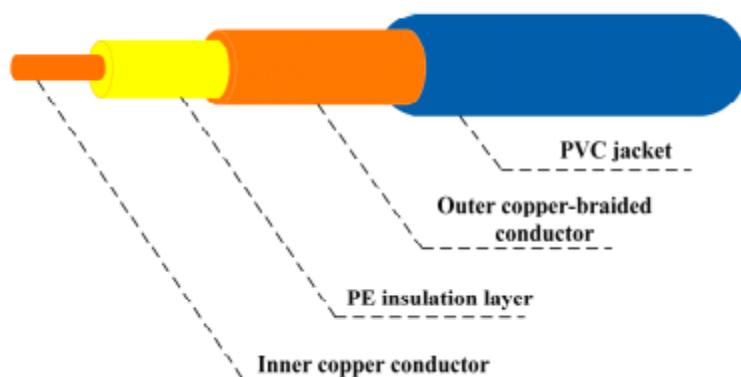
#### ۴-۲-۲- پیکربندی کابل شیلددار

در این پیکربندی از یک کابل کواکسیال<sup>۲۹</sup> شیلددار استفاده می‌شود. کابل کواکسیال انواع مختلفی دارد که مصارف مخابراتی و تصویربرداری از آن استفاده می‌شود. در این پروژه از یک کابل RG59 به عنوان عملگر حساس که خازن را درون خود تشکیل می‌دهد استفاده می‌شود.



شکل ۲۶: نمایی از یک کابل کواکسیال RG59

همانطور که در شکل ۲۶ مشاهده می‌شود این کابل شیلددار است و دارای لایه محافظ می‌باشد.



شکل ۲۷: نمای شماتیک کابل RG59 [5]

همانطور که در شکل بالا مشاهده می‌شود این کابل از ۴ لایه از داخل به خارج تشکیل شده است: یک رسانای داخلی از جنس مس می‌باشد که اصطلاحاً مغزی<sup>۳۰</sup> نامیده می‌شود، یک لایه عایق از جنس پلی‌اتیلن<sup>۳۱</sup>، یک لایه رسانای خارجی بافته‌شده از جنس مس که بصورت شیلد قرار دارد و یک لایه ایزوله شده از جنس پی‌وی‌سی<sup>۳۲</sup> که چهار لایه تشکیل‌دهنده این کابل کواکسیال را نشان می‌دهند. اغلب کابل‌های کواکسیال از این ساختار تشکیل شده‌اند و خیلی تفاوتی مابین انواع کابل کواکسیال در مصرف مورد انتظار این پروژه وجود ندارد.

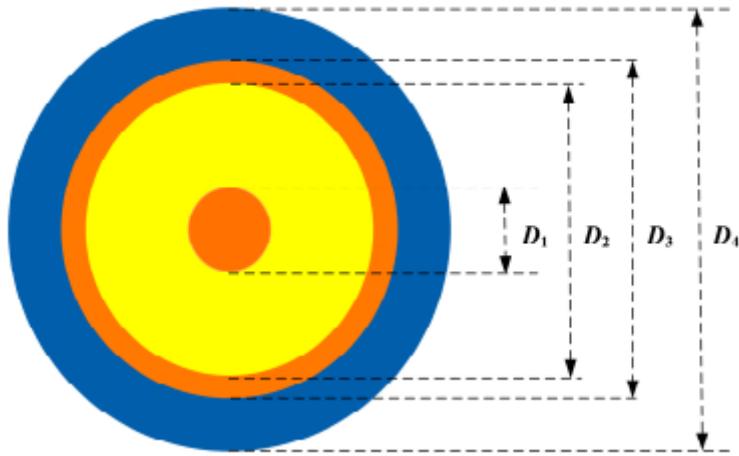
در این نوع پیکربندی یک ترمینال خازن لایه رسانای داخلی یا همان مغزی است و یک ترمینال دیگر خازن مورد نظر، لایه شیلد محافظ و همان رسانای خارجی می‌باشد. در این نوع پیکربندی دیگر سه خازن موازی با یکدیگر تشکیل می‌شود که دو عدد از آن‌ها ظرفیت ثابت و تحت عنوان خازن مرجع، عمل می‌کند و ظرفیت یک خازن دیگر به ارتفاع آب موجود در مخزن بستگی دارد و هرچند سطح آب بالاتر بیاید، ظرفیت آن خازن افزایش پیدا می‌کند.

<sup>29</sup> Coaxial

<sup>31</sup> PE

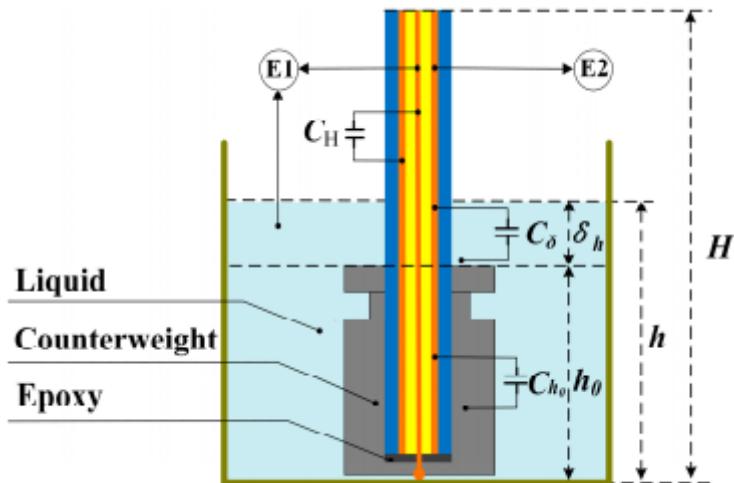
<sup>30</sup> Core

<sup>32</sup> PVC



شکل ۲۸: نمای داخلی یک کابل کواکسیال [۵]

در شکل ۲۸ نمای از بالا یک کابل را مشاهده می‌کنید که قطر هر کدام از لایه مشخص است. در بخش‌های آینده برای آنالیز معادلات حاکم بر این سیستم از این ابعاد استفاده خواهد شد. در این شکل، قطر لایه‌های رسانای داخلی، لایه محافظ PE، لایه رسانای خارجی و لایه ایزوله PVC به ترتیب با  $D_4, D_3, D_2, D_1$  نشان داده شده است.



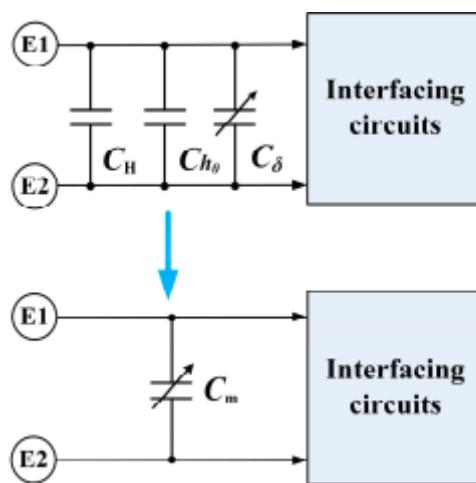
شکل ۲۹: ساختار درونی پیکربندی یک حسگر سطح‌سنج [۵]

همانطور که در شکل ۲۹ مشاهده می‌شود یک استوانه استیل ضدزنگ<sup>۳۳</sup> به عنوان وزنه کابل متصل شده است. این وزنه سبب می‌شود که هم کابل بطور ثابت و stable در آب غوطه‌ور باشد و هم سبب می‌شود که بین مغزی کابل و مایع رسانا، آب، اتصال برقرار شود. دو ترمینال E1 و E2 به برد الکترونیکی وصل می‌شود و اختلاف پتانسیل در آن‌ها بوجود می‌آید. آز آن جا که بین وزنه و مغزی کابل اتصال برقرار است و از برقراری ارتباط بین شیلد و مغزی با استفاده از تزریق مقداری اپوکسی داخل وزنه جلوگیری شده و به اصطلاح عایق‌بندی شده است، آب نیز مانند مغزی با ترمینال E1 در شکل مشخص است.

<sup>33</sup> stainless steel

همانطور که در شکل مشخص است به محض برقراری جریان در ترمینال‌ها، ۳ خازن در این پیکربندی تشکیل می‌شود:

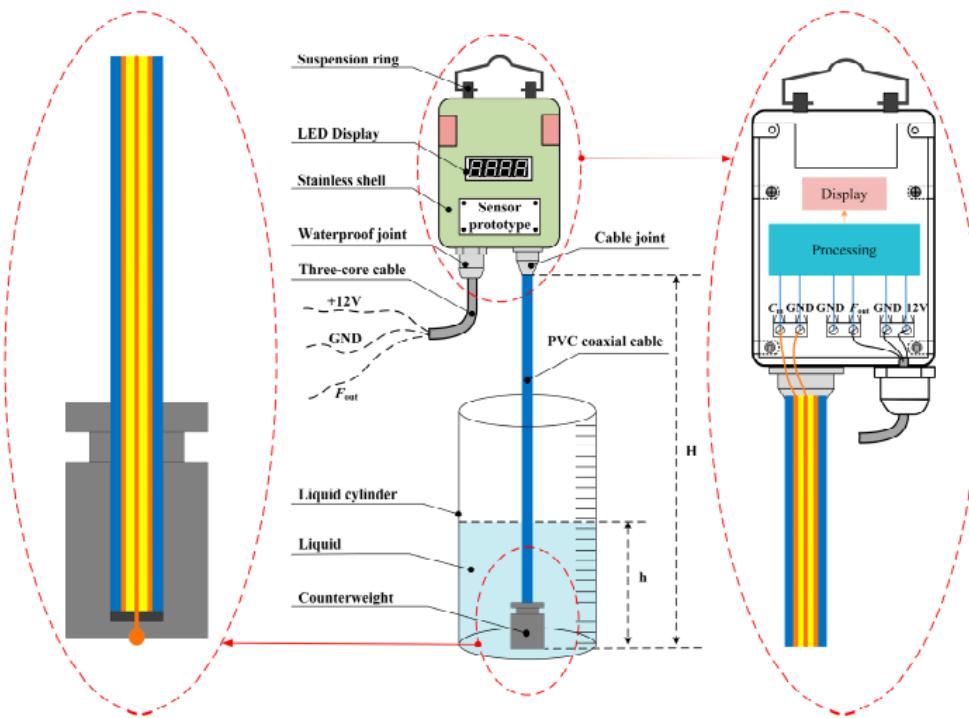
در حالت اولیه که مخزن خالی از آب است، ظرفیت بین  $C_0$  و  $E2$  به عنوان  $C_0$  تعریف می‌شود. بدیهی است که  $C_0$  از دو خازن دیگر با نام‌های  $C_H$  و  $C_{h0}$  تشکیل شده‌است.  $C_H$  ظرفیت بین هادی داخلی مسی و هادی خارجی مسی است یا به اصطلاح ظرفیت بین معزی و شیلد است. دی‌الکتریک مابین دو طرف این خازن، PE است.  $C_{h0}$  ظرفیت بین هادی خارجی و وزنه استیل غوطه‌ور در آب است. دی‌الکتریک مابین دو طرف این خازن، پوشش PVC است. هنگامیکه سطح آب مابین صفر تا  $h_0$  تغییر می‌کند، ظرفیت بین دو ترمینال ثابت باقی می‌ماند که همیشه برابر  $C_0$  است. اما پس از آن، به محض اینکه سطح مایع از  $h_0$  بالاتر بیاید، کابل کواکسیال PVC بیشتر در آب غوطه‌ور می‌شود و به همین ترتیب ظرفیت بین  $E1$  و  $E2$  افزایش می‌یابد. افزایش ظرفیت ناشی از ارتفاع آب در مخزن، به عنوان  $C_\delta$  تعریف می‌شود. در نتیجه مجموع ظرفیت خازن اندازه‌گیری شده برابر با  $C_m$  که برابر مجموع ظرفیت دو خازن  $C_0$  و  $C_\delta$  می‌باشد. مدار معادل با این سه خازن در شکل زیر آورده شده است.



شکل ۳۰: مدار معادل خازن‌های تشکیل شده در پیکربندی [۵]

پس به طور کلی می‌توان ساختار کلی حسگر را بดین شکل بیان کرد. ظرفیت خازن تشکیل شده توسط کابل کواکسیال PVC با طول کابل غوطه‌ور شده در آب، افزایش می‌یابد و سیستم اندازه‌گیری سطح مایع را فراهم می‌کند. همانطور که مشخص است یک انتهای کابل کواکسیال با استفاده از رسانای داخلی یا معزی به وزنه استیل متصل می‌شود، در حالیکه سمت دیگر کابل با استفاده از گلنند به کیس محافظ و سپس به برد الکترونیکی متصل می‌شود. جزئیات طراحی کیس را در بخش‌های بعدی مطرح خواهیم کرد. علاوه بر این رسانای داخلی و خارجی را با استفاده از یک ترمینال BNC به برد الکترونیکی وصل کرده و هادی داخلی، در نقش  $C_m$  و شیلد در نقش GND ایفای نقش می‌کنند. خازن ساخته شده پس از گذر از مدارات آنالوگ و تولید پالس و یکسری واحد پردازش سیگنال، پالس تولیدی وارد میکروکنترلر<sup>۳۴</sup> می‌شود تا با محاسبه سطح مایع در مخزن، با نرم‌افزار طراحی شده در کامپیوتر ارتباط برقرار کند و عملکرد مانیتورینگ به بهترین شکل انجام پذیرد.

<sup>۳۴</sup> MCU



شکل ۳۱: شکل نمادین بیکردنی کامل حسگر سطح سنج خازنی [۵]

همانطور که در شکل بالا مشخص است تمام برد الکترونیکی داخل کیس عایق و ضدزنگ هستند و کابل تغذیه مدار نیز با یک کابل سه رشته با ایمنی بالا بطور جداگانه وارد کیس محافظت شده است. البته جزئیاتی دیگر در این شکل نشان داده شده است که بعضی در این پروژه کاربرد ندارد.

## ۲-۵-۲- روابط حاکم بر حسگر سطح سنج طراحی شده

همانطور که در شکل ۲۹ دیده شد، با غوطه ور شدن کابل کواکسیال در مخزن، سه خازن موازی شکل تشکیل می شود.

$$C_H = \frac{2\pi\epsilon_0\epsilon_r H}{\ln \frac{D_2}{D_1}}, C_{h_0} = \frac{2\pi\epsilon_0\epsilon_t h_0}{\ln \frac{D_4}{D_3}}, C_\delta = \frac{2\pi\epsilon_0\epsilon_t \delta_h}{\ln \frac{D_4}{D_3}}$$

معادله ۳: رابطه ظرفیت خازن های تشکیل شده در کابل کواکسیال

$$C_0 = C_H + C_{h_0} = \frac{2\pi\epsilon_0\epsilon_r H}{\ln \frac{D_2}{D_1}} + \frac{2\pi\epsilon_0\epsilon_t h_0}{\ln \frac{D_4}{D_3}}$$

معادله ۴: رابطه ظرفیت خازن مرجع ثابت

$$C_m = C_0 + C_\delta = C_0 + \frac{2\pi\epsilon_0\epsilon_t \delta_h}{\ln \frac{D_4}{D_3}}$$

معادله ۵: رابطه ظرفیت خازن معادل

روابط بالا، معادلات حاکم بر این سیستم و حسگر سطح سنج خازنی هستند. که در این روابط موارد زیر را داریم:

جدول ۷: پارامترهای روابط حاکم

واحد	مقدار	توضیح	پارامتر
$\frac{F}{m}$	$8.85 \times 10^{-12}$	ثابت گذرهای خلا	$\epsilon_0$
Dimensionless	2.3	ضریب گذرهای نسبی لایه PE	$\epsilon_r$
Dimensionless	4.8	ضریب گذرهای نسبی لایه PVC	$\epsilon_t$
mm	0.75	قطر لایه رسانای داخلی یا مغزی	$D_1$
mm	4.8	قطر لایه محافظ PE	$D_2$
mm	5	قطر لایه رسانای خارجی یا شیلد	$D_3$
mm	7.2	قطر کلی کابل یا لایه PVC	$D_4$
m	1.2	ارتفاع کلی کابل	$H$
m	0.1	ارتفاع وزنه ثابت مرجع	$h_0$
m	0.1~1.1	ارتفاع مایع درون مخزن	$h$
m	0~1	ارتفاع مایع مزاد مرجع	$\delta_h$
pF	134.76	ظرفیت خازن مرجع	$C_0$

بر اساس روابط و جدول بالا رابطه ای خطی بین ارتفاع سطح آب درون مخزن و ظرفیت خازن معادل وجود دارد.

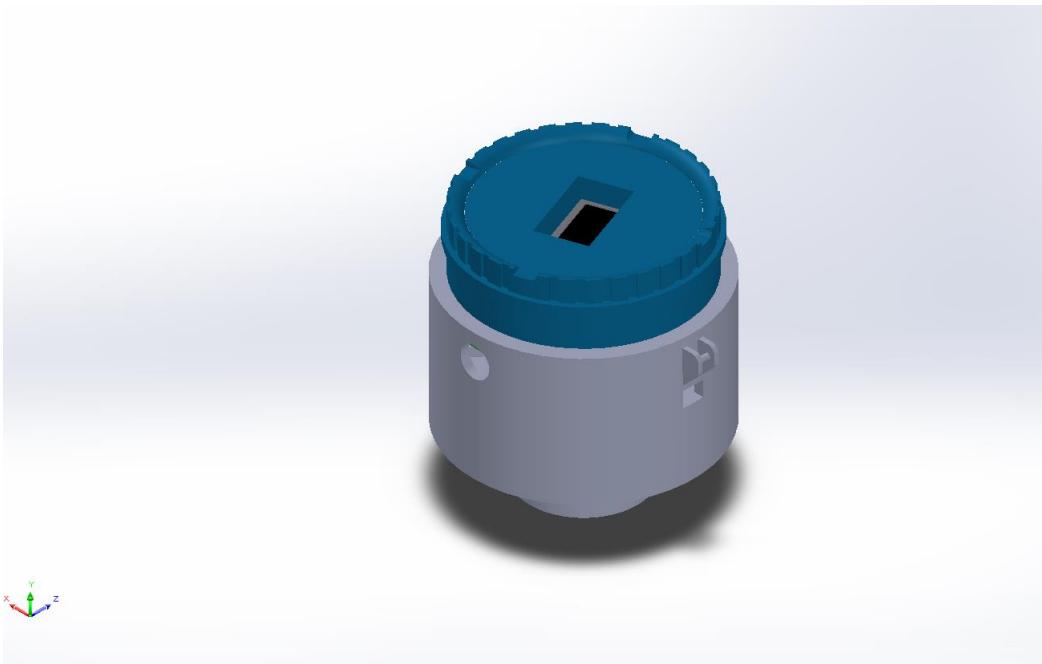
$$C_m = C_0 + C_\delta = 134.76 + 731.98\delta_h \approx 134.76 \sim 866.74 \text{ pF}$$

معادله ۶: رنج ظرفیت خازن تشکیل شده [5]

نتایج محاسبات در رنج اندازه‌گیری سطح مایع ۱ متر، محدوده تغییرات ظرفیت خازن از نظر تئوری بین ۱۳۴.۷۶ الی ۸۶۶.۷۴ پیکوفاراد است. علاوه بر این، این مقادیر در محدوده پیکوفاراد است که در طراحی اینمنی ذاتی مجاز است. مطالعات تجربی و سایر نتایج بطور مفصل در فصل مریبوطه بررسی خواهد شد.

## ۶-۲-۲- پیاده‌سازی و ساخت

در این بخش مروری بر نحوه ساخت اجزای مختلف این حسگر انجام خواهد شد. اجزای مختلف این حسگر شامل کیس محافظ، ساختار اتصال کابل کواکیسال به کیس و ساختار اتصال کابل به وزنه شناور در آب می‌باشد که بررسی خواهد شد.



شکل ۳۲: نمای ایزومتریک از کیس محافظ حسگر خازنی

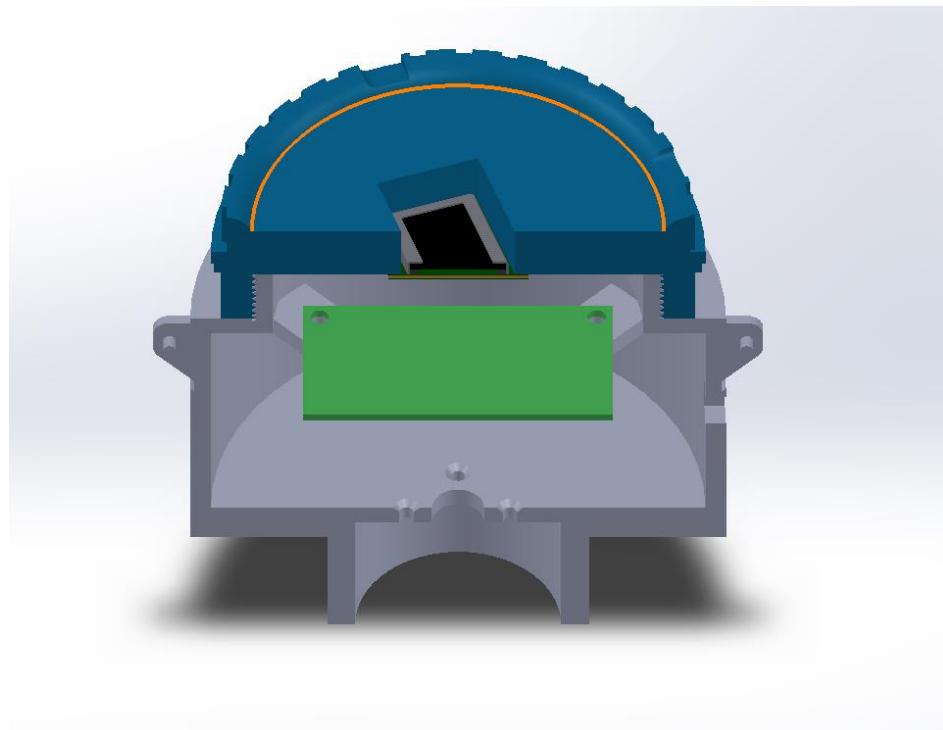
در شکل ۳۲ نمای ایزومتریک کیس محافظ حسگر را مشاهده می‌شود. این کیس شامل یک بخش درجداشونده<sup>۳۵</sup>، یک حفره برای گذر کابل تغذیه و کابل ارتباط سریال و دو اسلات برای قراردادن برد الکترونیکی<sup>۳۶</sup> و LCD کاراکتری می‌باشد. این کیس باید از جنسی با استحکام بالا و ضدزنگ باشد در کنار محیط مرطوب مخزن دچار زنگزدگی نشود. برای این پروژه با استفاده از چاپ سه بعدی<sup>۳۷</sup> با جنس PLA این کیس ساخته می‌شود. با توجه به ظرافت‌های موجود در کیس، از ضخامت ۰.۲ میکرون استفاده می‌شود. ابعاد این کیس به قطر ۱۳ سانتی‌متر و ارتفاع ۷.۵ سانتی‌متر می‌باشد. یک قسمت در قسمت پایینی کیس، قسمتی برای وصل شدن حسگر به مخزن قرار دارد که قابلیت اتصال چه با فلتچ و چه با پیچ به مخزن را دارد. در قسمت فوقانی کیس نیز رزوه‌ای برای پیچ شدن درجداشونده قرار دارد که برای جداسازی برد الکترونیکی داخل کیس نیز از همین طریق اقدام می‌شود.

البته لازم به گفتن است که در صورت استفاده از این حسگر به صورت صنعتی لازم است در مورد جنس ماده‌ی مورد استفاده به علت هزینه آن، تجدید نظری صورت پذیرد.

<sup>35</sup> Cap

<sup>36</sup> PCB

<sup>37</sup> 3D Printing



شکل ۳۳: نمای داخلی کیس محافظ حسگر خازنی

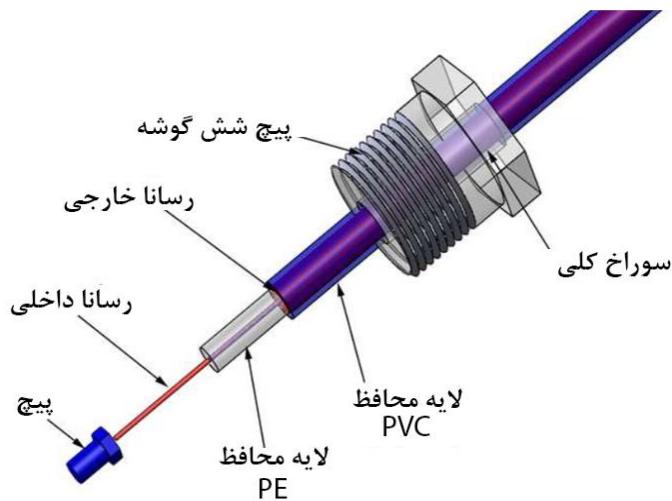
برای وصل کردن کابل کواکسیال به کیس محافظ از یک گلندر سایز مناسب استفاده خواهد شد. با توجه به سایز کابل کواکسیال مورد استفاده از گلندر PG7 استفاده خواهیم کرد. جنس PG7 هم از نوع پلی آمید و هم از نوع استیل در بازار وجود دارد.



شکل ۳۴: گلندر PG7 مورد استفاده از جنس پلی آمید

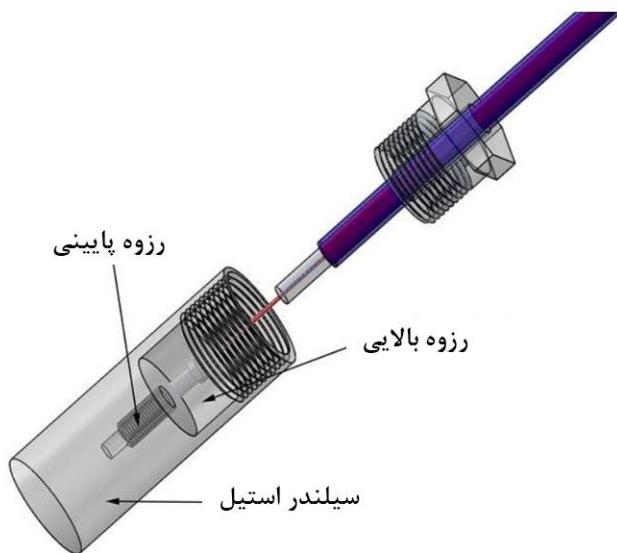
برای اتصال تحتانی کابل کواکسیال، به وزنه شناور در مخزن از ساختار طراحی شده به شکل زیر استفاده می‌شود. از با استفاده از یک پیچ شش گوشه<sup>۳۸</sup> و یک میله استیل به قطر ۲ سانتی‌متر قسمت مغزی کابل کواکسیال را به قسمت داخلی میل‌گرد متصل خواهد شد و با استفاده از پیچ و اپوکسی آبندی در این وزنه تکمیل خواهد شد.

<sup>38</sup> Hex Bolt



شکل ۳۵: ساختار قوارگیری کابل کواکسیال داخل وزنه شناور

در شکل بالا با ایجاد یک سوراخ راهبهد در پیچ شش گوشه، کابل کواکسیال از میان این پیچ گذرانده می‌شود و با استفاده از پیچ مغزی کابل به وزنه متصل خواهد شد.

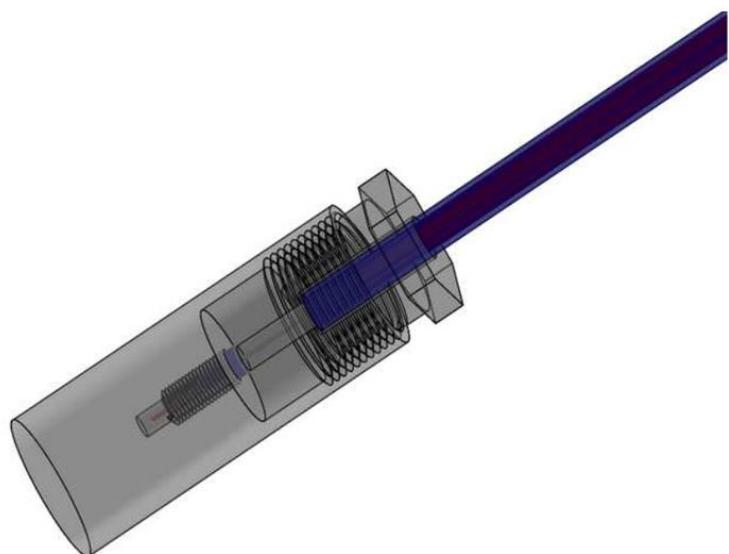


شکل ۳۶: ساختار سیلندر استیل

با ایجاد دو رزوه داخل میلگرد استیل، مغزی کابل در رزوه پایینی ست خواهد شد و پیچ شش گوشه در رزوه بالایی ست خواهد شد. البته ساخت چنین قطعه‌ی مینیاتوری در ابعاد کم (قطر ۵ سانتی‌متر، ارتفاع ۱۲ سانتی‌متر) با استفاده از دستگاه تراش و زدن رزوه داخل میلگرد، به ساخت ابزاری مخصوص با استفاده از رابط آچار بکس برای قلاویز زدن در داخل میلگرد نیاز هست. این ابزار ساخته شده در شکل زیر دیده خواهد شد.



شکل ۳۸: ابزار ساخته شده برای قلاویز زدن در کارگاه تراش



شکل ۳۷: نمای اسembل شده اتصال کابل کواکسیال به وزنه شناور

در این بخش سعی شد مسیر طراحی و ساخت اجزای مکانیکی این حسگر بیان شود. در بخش‌های بعدی دیگر اجزای این حسگر به تفصیل بررسی خواهد شد.

## ۳-۲- طراحی مدار الکترونیکی

در بخش‌های گذشته به بررسی نحوه ساخت خازن بهوسیله کابل کواکسیال پرداخته شد؛ در این بخش به بررسی مدارهای الکترونیکی حسگر پرداخته خواهد شد. ابتدا به بررسی مدار آنالوگ و سپس به بررسی طراحی برد مدار چاپی<sup>۳۹</sup> پرداخته خواهد شد. در مدار آنالوگ، پالسی ایجاد خواهد شد که فرکانس آن با ظرفیت خازن ایجادشده در کابل کواکسیال، رابطه دارد. پس از آن پالس ایجاد شده به میکروکنترلر وارد شده و مورد تجزیه و تحلیل واقع خواهد شد.

## ۱-۳-۲- مدار آنالوگ

در این قسمت به آن نیاز هست که هرگونه تغییر در ظرفیت خازن کابل کواکسیال به نوعی سیگنال قابل تحلیل در میکروکنترلرها تبدیل شود. روش‌های گوناگونی برای انجام این کار وجود دارد که میتوان هرگونه تغییر در ظرفیت خازن به تغییر ولتاژ مبدل کرد و سپس با استفاده از ADC آن به سیگنال دیجیتال تبدیل کرده و وارد میکروکنترلر کرده و مورد تجزیه و تحلیل قرار داده شود. اما ترجیح این است که از ADC ها تا حد امکان استفاده نشود در حقیقت بدیل گران بودن ADC ها با رزولیشن بالا در بازار و دقت پایین ADC های طراحی شده در میکروکنترلرهایی مانند ARM stm32 استفاده از ADC ها برای این منظور نامطلوب است و ترجیح آن است که از روش دیگری استفاده شود. پس تحقیق و بررسی‌های متعدد و مطالعه‌ها در مقاله‌های مختلف مانند [12] و [13] و [5] به روши جدید برای پیاده‌سازی این مدار طراحی شد.

با استفاده از یک اسیلاتور آرام<sup>۴۰</sup> می‌شود پالس مربعی ایجاد شود که فرکانس خروجی آن به خازنی که در مدار آن طراحی شده است وابسته است. پالس مربعی ایجاد شده همانند یک سیگنال دیجیتال است که می‌تواند وارد میکروکنترلر شود و مورد تحلیل سیگنال قرار گیرد. حال مروری بر یکی از انواع اسیلاتور آرام یعنی آی سی معروف ۵۵۵ و مدار مربوطه انجام خواهد شد.

## ۲-۳-۲- مروری بر اسیلاتور ۵۵۵

تایمر ۵۵۵ یک آی سی بسیار متداول است که برای تولید گستره وسیعی از شکل موج‌های ولتاژ الکتریکی طراحی شده است. برای مثال با اتصال یک مدار RC خارجی به تایمر به راحتی می‌توان شکل موج‌های پالس، پله‌ای و موج مربعی را تولید کرد. نوسان‌سازهای CMOS و مولتی‌ویبراتورها<sup>۴۱</sup> می‌تواند به سادگی از عناصر گستته ساخته شوند و برای ایجاد نوسان‌های آرام در تولید شکل موج خروجی موج مربعی ساده مورد استفاده قرار گیرند. اما آی سی‌های اختصاصی وجود دارند که مخصوص تولید شکل موج مورد نیاز به صورت دقیق هستند. چنین المانی که از اوایل عصر آی سی وجود داشت و عضوی از استانداردهای صنعتی شده است، نوسان‌ساز تایمر ۵۵۵ است که به آن تایمر ۵۵۵ نیز گفته می‌شود.

تایمر ۵۵۵ نام خود را از این واقعیت گرفته است که دارای سه مقاومت  $5K\Omega$  است که در داخل آی سی به هم متصل هستند. این مقاومت‌ها برای تولید دو ولتاژ مرجع مقایسه مورد استفاده قرار می‌گیرند. تایمر ۵۵۵ یک آی سی بسیار ارزان، محبوب و المان زمان‌بندی دقیق است که می‌تواند هم به عنوان یک تایمر ساده برای تولید پالس تکی و یا تاخیرهای زمانی طولانی مدت مورد استفاده قرار گیرد و هم به عنوان یک نوسان‌ساز آرام برای تولید شکل موج‌های پایدار با چرخه کاری<sup>۴۲</sup> متغیر از ۵۰ تا ۱۰۰٪ عمل کند.

تراشه تایمر ۵۵۵ المانی بسیار پایدار و دارای ۸ پین است که می‌تواند به عنوان یک مولتی‌ویبراتور مونواستابل<sup>۴۳</sup>، بای‌استابل<sup>۴۴</sup> و یا آستابل<sup>۴۵</sup> مورد استفاده قرار گیرد. این تراشه دارای کاربردهای بسیار گسترده در مداراتی است که به نوعی به کنترل زمان

<sup>39</sup> PCB

<sup>40</sup> Relaxation Oscillator

<sup>41</sup> Multivibrator

<sup>42</sup> Duty Cycle

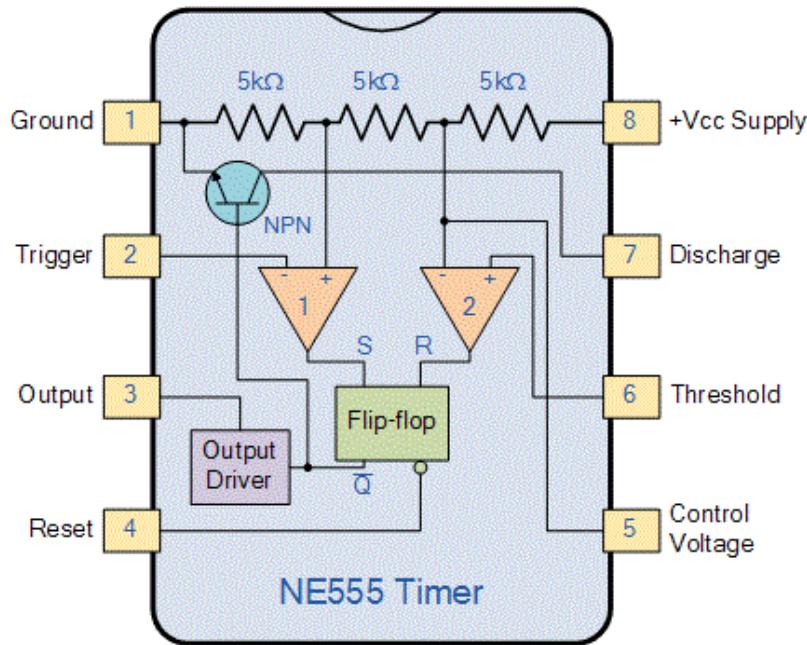
<sup>43</sup> Monostable

<sup>44</sup> Bistable

<sup>45</sup> Astable

نیاز دارند. تایمراهی تاخیری، مولدهای پالس، LED، چراغهای چشمکزن، آلام، کلاکهای منطقی، مقسم فرکانس، منابع تغذیه و مبدل‌ها مثالی از این مدارات هستند.

تراشه تایمر ۵۵۵ از ۲۵ ترانزیستور، ۲ دیود و ۱۶ مقاومت به فرم دو مقایسه‌گر، یک فلیپ فlap و یک طبقه خروجی جریان بالا تشکیل شده است. تایمر نوسان‌ساز NE556 نیز تراشه دیگری است که در آن دو تایمر ۵۵۵ با یکدیگر ترکیب شده‌اند. نوع CMOS توان پایین تایمراهی ۵۵۵، مانند ۷۵۵۵ و LMC555 که از ترانزیستورهای MOSFET استفاده می‌کنند نیز در حال حاضر موجود هستند. در شکل زیر یک دیاگرام ساده از مدار داخلی تایمر ۵۵۵ نشان داده شده است.



شکل ۳۹: دیاگرام ساده از مدار داخلی تایمر ۵۵۵ [14]

در این قسمت به معرفی پین‌های تایمر ۵۵۵ پرداخته می‌شود تا در ک اجمالی از نحوه کار این آی‌اسی به دست آورده شود:

- Pin1: پین شماره ۱، Ground نام دارد که تایمر ۵۵۵ را به منفی منبع تغذیه متصل می‌کند.
- Pin2: پین شماره ۲، Trigger، ورودی منفی برای مقایسه‌گر شماره ۱ است. یک پالس منفی روی این پین زمانی که ولتاژ ورودی به  $1/3$  مقدار ولتاژ VCC افت کند، فلیپ فlap را SET می‌کند تا خروجی از حالت LOW به حالت HIGH تغییر وضعیت دهد.
- Pin3: این پین Output نام دارد و می‌تواند هر مدار TTL را حمایت کند و نیز می‌تواند تا  $200\text{mA}$  جریان خروجی در ولتاژ VCC برابر با  $1.5$  ولت را تامین کند.
- Pin4: پین شماره ۴، Reset است. این پین برای تنظیم مجدد یا ریست (Reset) فلیپ فlap داخلی به منظور کنترل حالت خروجی (پین شماره ۳) مورد استفاده قرار می‌گیرد. این پین یک ورودی Active-low است و معمولاً زمانی که مورد استفاده قرار نمی‌گیرد، برای جلوگیری از ریست ناخواسته خروجی، به ولتاژ سطح یک منطقی متصل می‌شود.
- Pin5: این پین در شکل بالا با Control Voltage مشخص شده است. پین شماره ۵ زمان‌بندی (Timing) تایمر ۵۵۵ را از طریق حذف  $2/3$  سطح ولتاژ VCC از شیکه مقسم ولتاژ و ایجاد یک سطح ولتاژ مقایسه جدید انجام

- می‌دهد. با اعمال ولتاژ به این پین، عرض سیگنال خروجی می‌تواند بسته به شبکه زمان‌بندی RC، تغییر کند. وقتی از این پین استفاده نشود، معمولًا با یک خازن  $10nF$  به زمین متصل می‌شود تا از ایجاد نویز جلوگیری شود.
- Pin6: این پین Threshold نام دارد و ورودی مثبت برای مقایسه‌گر شماره ۲ است. این پین برای ریست کردن فلیپ فلاب، زمانی که ولتاژ اعمالی به آن از  $2/3$  مقدار ولتاژ VCC بیشتر شود، مورد استفاده قرار می‌گیرد و منجر به تغییر حالت خروجی از حالت HIGH به حالت LOW می‌شود. این پین مستقیماً به مدار زمان‌بندی RC متصل می‌شود.
  - Pin7: این پین Discharge نام دارد. پین شماره ۷ مستقیماً به کلکتور ترانزیستور NPN داخلی متصل می‌شود و برای تخلیه خازن زمان‌بندی از طریق زمین در زمان‌هایی است که خروجی پین ۳ به حالت LOW تغییر وضعیت دهد.
  - Pin8: پین شماره ۸، تغذیه مثبت یا VCC است. این پین مربوط به منبع تغذیه است و برای تایمر ۵۵۵ معمولی بین ۴.۵ تا ۱۵ ولت است.

همان‌طور که قبلاً اشاره شد، نام تایمر ۵۵۵ برگرفته از این واقعیت است که سه مقاومت  $5K\Omega$  متص禄 هستند، در این تایمر وجود دارند. این مقاومتها یک شبکه مقسم ولتاژ بین ولتاژ تغذیه (پین شماره ۸) و ولتاژ زمین (پین شماره ۱) می‌سازند. ولتاژ در طول این شبکه مقاومت‌های سری، ورودی منفی معکوس کننده مقایسه‌گر شماره ۲ را در  $2/3$  ولتاژ VCC و ورودی مثبت غیرمعکوس کننده مقایسه‌گر شماره ۱ را در  $1/3$  ولتاژ VCC نگه می‌دارد.

دو مقایسه‌گر، ولتاژ خروجی را تولید می‌کنند که بسته به اختلاف ولتاژ دو ورودی آن‌ها است و توسط عمل شارژ و تخلیه مدار RC خارجی متص禄 به آن تعیین می‌شوند. خروجی هر دو مقایسه‌گر به دو ورودی فلیپ فلاب متصل می‌شود. فلیپ فلاب یک خروجی سطح HIGH یا  $\bar{Q}$  در LOW تولید می‌کند که به حالت ورودی‌های آن بستگی دارد. خروجی فلیپ فلاب برای کنترل طبقه بافر خروجی جریان بالا مورد استفاده قرار می‌گیرد. این خروجی برای راهاندازی بار متصل و تولید خروجی HIGH یا LOW در پین خروجی کاربرد دارد. [14]

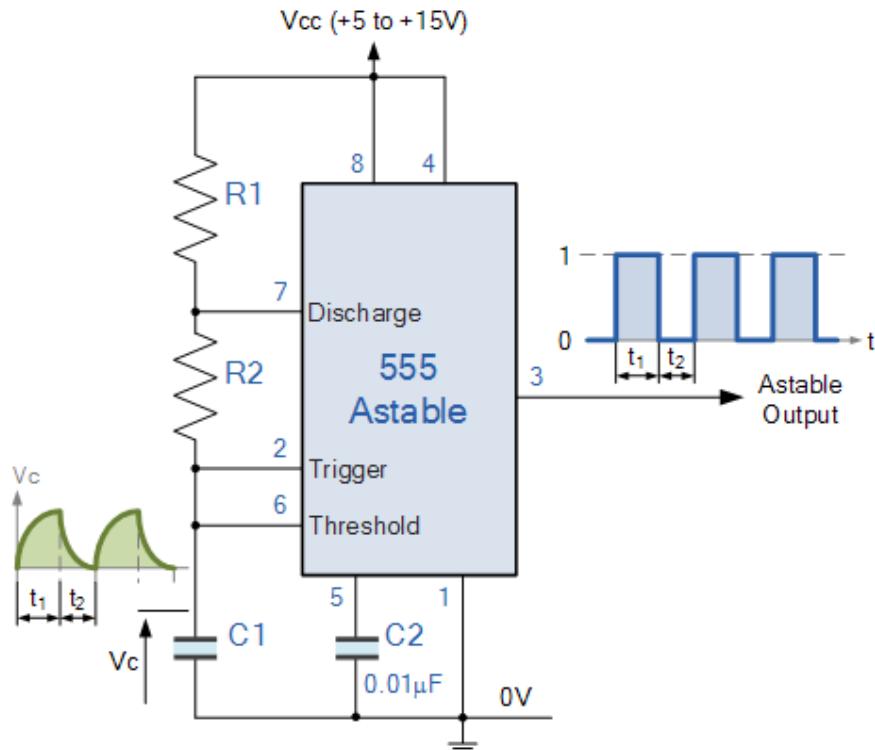
متداول‌ترین کاربرد تایмер نوسان‌ساز ۵۵۵ به عنوان نوسان‌ساز آستابل ساده از طریق اتصال دو مقاومت و یک خازن در طول ترمینال‌های آن است، تا یک قطار پالس ثابت تولید کند که دوره تناوب توسط ثابت زمانی مدار RC تعیین می‌شود.

برای ایجاد یک مدار اسیلاتور ۵۵۵ آستابل، لازم است که مدار ۵۵۵ به صورت دائمی بعد از هر دوره تناوب، تریگر مجدد شود. عملکرد تریگر مجدد را می‌توان با اتصال ورودی تریگر (پین شماره ۲) به ورودی حد آستانه (پین شماره ۶) ایجاد کرد. در نتیجه برای این حالت مدار مانند یک اسیلاتور آستابل عمل می‌کند. یک مدار اسیلاتور ۵۵۵ هیچ حالت پایداری ندارد و به صورت دائمی از یک حالت به حالت دیگر نوسان می‌کند. در این مدار، بر خلاف مدار مولتی ویبراتور مونو استابل، به جای یک مقاومت زمان‌بندی، از دو مقاومت زمان‌بندی استفاده می‌شود. محل تلاقی مقاومت‌های زمان‌بندی یعنی R1 و R2 را باید به ورودی دشاز آسی، یعنی پین شماره ۷ متصل کرد. نمایی از مدار اسیلاتور ۵۵۵ آستابل را در شکل زیر می‌توان مشاهده کرد.

در مدار اسیلاتور ۵۵۵ شکل، پین شماره ۲ و پین شماره ۶ به یکدیگر متصل شده‌اند. به همین دلیل مدار قادر است تا در هر چرخه یا دوره تناوب خود را تریگر مجدد کند و به عنوان یک اسیلاتور آزاد گرد<sup>۴۶</sup> عمل کند. در هر تناوب، خازن C1 خود را از

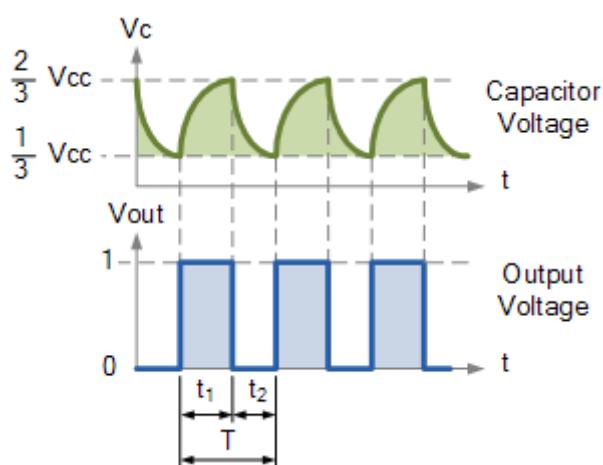
<sup>46</sup> Free Running

طریق مقاومت‌های زمان‌بندی  $R_1$  و  $R_2$  شارژ می‌کند. اما تخلیه خازن تنها از طریق مقاومت  $R_2$  انجام می‌پذیرد؛ زیرا سمت دیگر مقاومت  $R_2$  به ترمینال دشارژ (پین شماره 7) متصل شده است.



شکل ۴۰: مدار اسیلاتور ۵۵۵ استابل [14]

خازن تا مقدار  $\frac{2}{3}V_{cc}$  شارژ می‌شود که این مقدار حد بالای مقایسه‌کننده داخلی آی‌اسی است و از طریق ترکیب شبکه RC، یعنی تعیین ۰.۶۹۳ $(R_1 + R_2)C$  می‌شود. همچنین هنگام تخلیه، خازن تا  $\frac{1}{3}V_{cc}$  دشارژ می‌شود که حد پایین مقایسه‌کننده داخلی آی‌اسی است و توسط ۰.۶۹۳ $(R_2)C$  قابل تعیین است. خروجی این مدار شکل موجی است که سطح ولتاژ آن تقریباً برابر  $V_{cc} - 1.5V$  بوده و تناوب زمانی خاموش و روشن بودن آن توسط ترکیب خازن و مقاومت زمان‌بندی تعیین می‌شود.



شکل ۴۱: شکل موج خروجی اسیلاتور ۵۵۵ [14]

مقدار زمانی که این مدار برای تکمیل یک تناوب از شارژ و دشارژ شدن در خروجی نیاز دارد، از طریق فرمول‌های زیر محاسبه می‌شود:

$$t_1 = 0.693(R_1 + R_2)C$$

$$t_2 = 0.693 \times R_2 \times C$$

معادله ۷: فرمول محاسبه تناوب یک دوره خروجی تایمیر ۵۵۵

در این فرمول‌ها،  $R$  بر حسب اهم و  $C$  بر حسب فاراد است.

خروجی یک آی‌سی ۵۵۵، هنگامی که به عنوان یک مولتی‌ویبراتور آستابل مورد استفاده قرار می‌گیرد، به صورت پیوسته و همیشگی بین  $\frac{1}{3}V_{CC}$  و  $\frac{2}{3}V_{CC}$  نوسان می‌کند و این روند فقط با قطع شدن منبع تغذیه متوقف می‌شود. بنابراین، همانند آن‌چه در مولتی‌ویبراتورهای مونو آستابل مشاهده کردیم، زمان شارژ و دشارژ خازن و از همین رو فرکانس نوسان، مستقل از منبع تغذیه است. واضح است که دوره تناوب یک چرخه کامل از خروجی اسیلاتور ۵۵۵ برابر با مجموع زمان‌هایی است که در آن خازن شارژ و سپس دشارژ می‌شود. بنابراین دوره تناوب به صورت زیر به دست می‌آید:

$$T = t_1 + t_2 = 0.693 \times (R_1 + 2R_2) \times C$$

معادله ۸: فرمول محاسبه دوره تناوب خروجی تایمیر ۵۵۵

فرکانس نوسان خروجی برابر با معکوس دوره تناوب به دست آمده در بالا است. بنابراین مقدار فرکانس خروجی در اسیلاتور ۵۵۵ به صورت زیر به دست می‌آید:

$$f = \frac{1}{T} = \frac{1.44}{(R_1 + 2R_2) \times C}$$

معادله ۹: فرکانس خروجی اسیلاتور ۵۵۵

از طریق تغییر دادن یکی از ثابت زمانی‌های شبکه‌های  $RC$ ، می‌توان چرخه وظیفه<sup>۴۷</sup> در شکل موج خروجی به صورت بسیار دقیق تنظیم کرد. چرخه وظیفه برای اسیلاتور ۵۵۵ برابر با نسبت زمان روشن بودن پالس خروجی به خاموش بودن آن در نظر گرفته می‌شود و بر اساس فرمول زیر تعیین می‌شود:

$$Duty\ Cycle = \frac{T_{ON}}{T_{ON} + T_{OFF}} = \frac{R_1 + R_2}{(R_1 + 2R_2)}$$

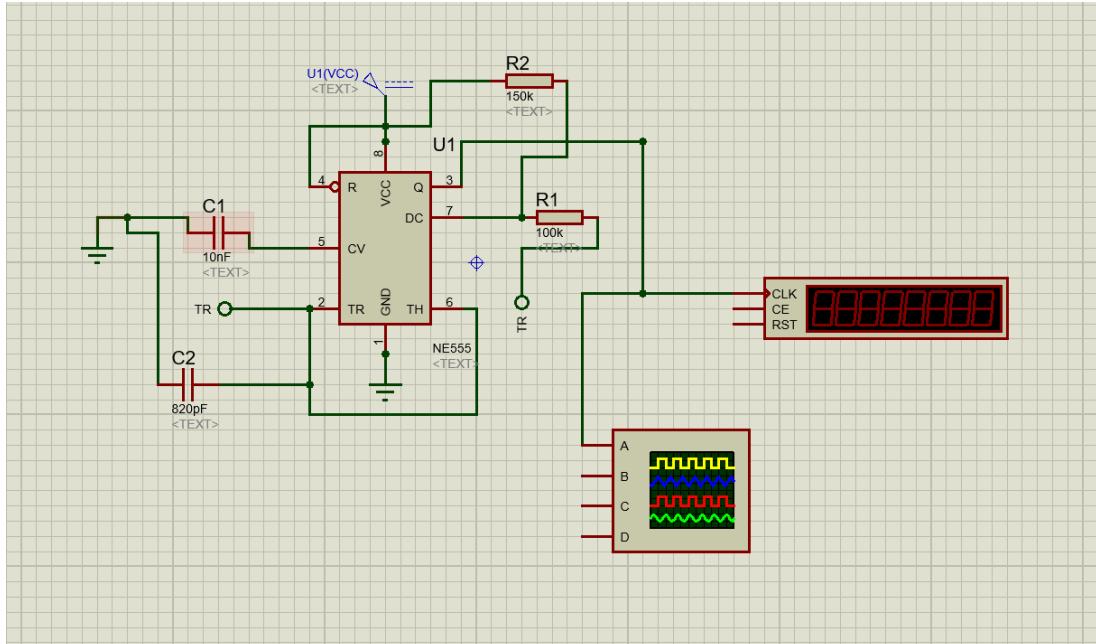
معادله ۱۰: فرمول چرخه وظیفه اسیلاتور ۵۵۵

با توجه به فرمول بالا، چرخه وظیفه هیچ واحدی ندارد؛ زیرا برابر با نسبت مقاومت‌ها است و واحدهای اهم در صورت و مخرج حذف می‌شوند. اما این کمیت را می‌توان بر حسب درصد بیان کرد. اگر هر دو مقاومت زمان‌بندی  $R_1$  و  $R_2$  دارای مقدار برابری باشند، آن‌گاه چرخه وظیفه سیگنال خروجی برابر با  $2/3$  بوده که به این معنی است که پالس خروجی در ۶۶ درصد از زمان تناوب خود روشن و در ۳۳ درصد از آن خاموش است. [14]

<sup>47</sup> Duty Cycle

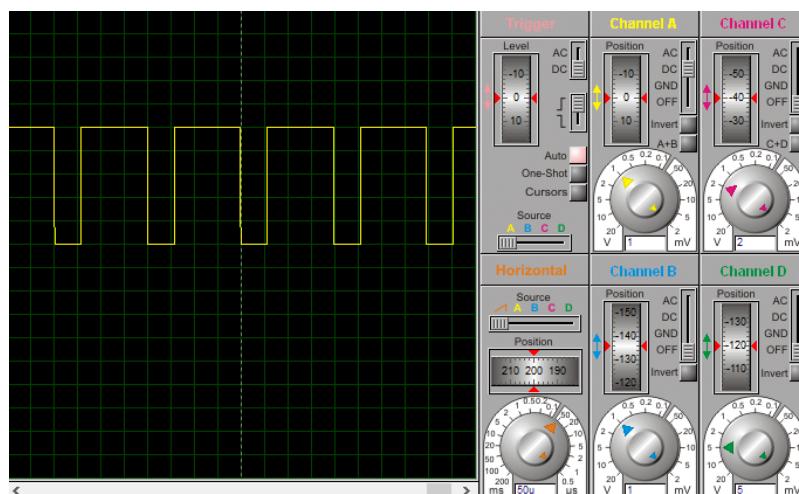
### ۳-۳-۲- شبیه‌سازی مدار اسیلاتور ۵۵۵

برای درک بهتر از عملکرد این اسیلاتور ابتدا سعی کرده مدار تایмер ۵۵۵ در نرم‌افزارهای شبیه‌ساز مانند پروتئوس<sup>۴۸</sup> و یا اورکد<sup>۴۹</sup> شبیه‌سازی کرده تا خروجی اسیلاتور در حالات مختلف بررسی شود.



شکل ۴۲: مدار شبیه‌سازی اسیلاتور ۵۵۵ در پروتئوس

در شکل ۴۲ مدار اسیلاتور ۵۵۵ در نرم‌افزار پروتئوس شبیه‌سازی شده است. تا عملکرد مدار بهتر درک شود. خروجی تایmer در شکل زیر مشاهده می‌شود که همانطور که انتظار می‌رفت یک پالس مربعی بدون نویز و اغتشاش شده است.



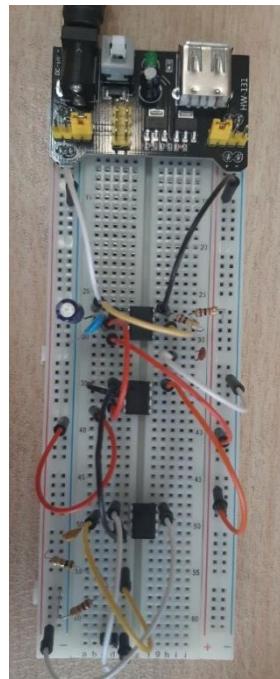
شکل ۴۳: خروجی اسیلاتور ۵۵۵ در پروتئوس

<sup>48</sup> Proteus

<sup>49</sup> OrCAD

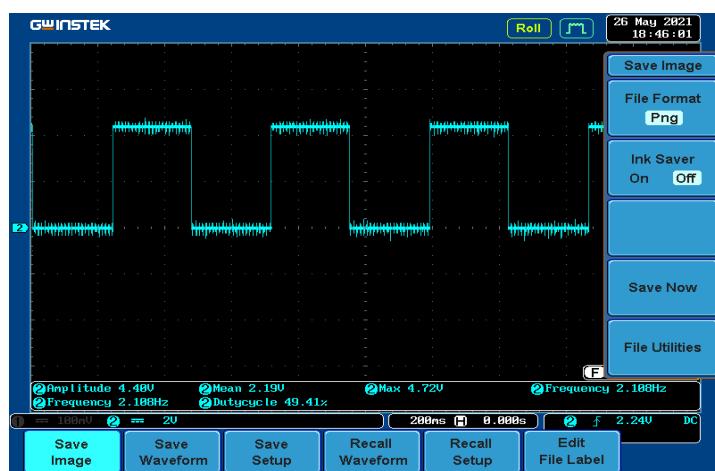
### ۴-۳-۲- پیاده‌سازی اسیلاتور ۵۵۵

همانطور که در شکل زیر دیده می‌شود، مدار اسیلاتور ۵۵۵ را در بردبورد<sup>۵۰</sup> پیاده‌سازی شده است. در این مدار به جای خازن مورد نظر ساخته شده با کابل کواکسیال از خازنی به ظرفیت خاصی با توجه رنج محاسبه شده در بخش‌های قبل استفاده شده است. با تغییر ظرفیت این خازن‌ها، خروجی اسیلاتور در اسیلوسکوپ مشاهده می‌شود.



شکل ۴۴: پیاده‌سازی مدار اسیلاتور ۵۵۵ بر روی بردبورد

در این شکل، از سه آی‌سی استفاده شده است. آی‌سی بالا، آی‌سی NE555 می‌باشد. دو آی‌سی زیر نیز یک آی‌سی آپ‌امپ می‌باشد که در قسمت‌های بعد بیشتر بحث خواهد شد. خروجی آی‌سی ۵۵۵ در اسیلوسکوپ بررسی خواهد شد. یکی از مشکلاتی که در این مدار بوجود آمد، نویزی بود که بروی پالس تولید توسط تایмер می‌افتد. این نویز در مراحل آینده میکروکنترلر را برای تشخیص فرکانس پالس دچار مشکل می‌کرد.



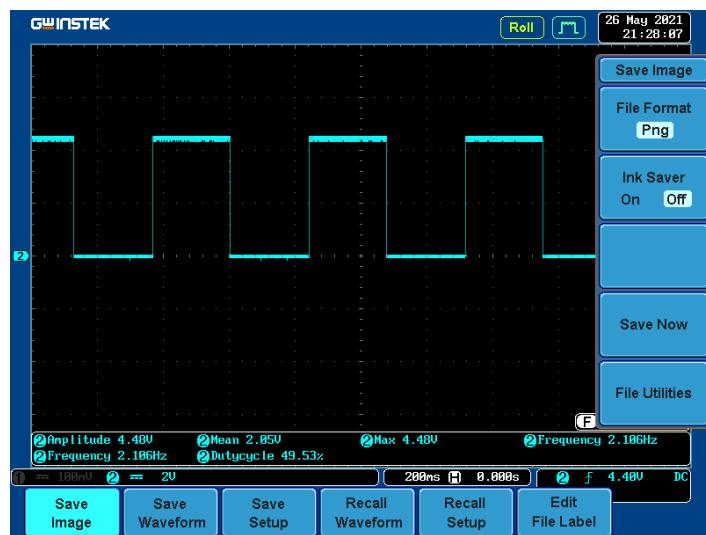
شکل ۴۵: خروجی اسیلاتور در اسکوپ همراه نویز

<sup>50</sup> Breadboard

## روش انجام پروژه

مهم‌ترین قدم برای حل کردن این مشکل طراحی مدار تغذیه مناسب برای مدار است که در بخش مربوطه به آن اشاره خواهد شد. پس از تغییر مدار تغذیه باز دیگر خروجی اسیلاتور در اسکوپ بررسی شده و نویز موجود در سیگنال تا حد بسیار خوبی از بین رفته است.

طراحی مدار آنالوگ به همین‌جا ختم نمی‌شود و اجزای دیگری در بخش‌های آینده به این مدار اضافه می‌شود که در هر قسمت به فراخور علت مربوطه، توضیح داده خواهد شد. در هر قسمت سیگنال خروجی بدست آمده از مدار آنالوگ در اسیلوسکوپ مشاهده کرده و بررسی خواهد شد. همچنین در فصل نتایج، خازن تشکیل شده با کابل به مدار ساخته شده وصل شده و سیگنال خروجی در اسکوپ بررسی خواهد شد.



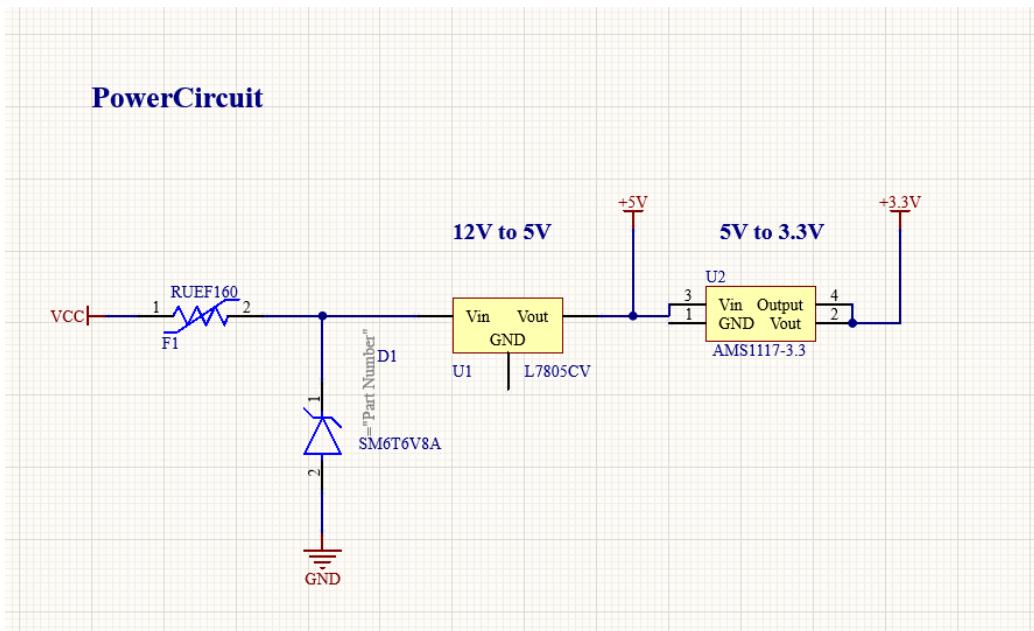
شکل ۴۶: خروجی اسیلاتور در اسکوپ بدون نویز پاور

### ۵-۳-۲- طراحی برد مدار چاپی<sup>۵۱</sup>

پیاده‌سازی چنین مداراتی شامل مدار آنالوگ، مدار تغذیه، مدار ارتباط با کامپیوتر و میکروکنترلر در بردبورد و برد هزارسوراخ بسیار پیچیده و نامطمئن و نایمن است. از طرفی برای داشتن یک محصول صنعتی، لازم است استانداردهایی رعایت شود به همین علت برای پیاده‌سازی مدارات و سیم‌کشی‌ها از برد مدار چاپی استفاده شده است. برای طراحی شماتیک و برد چاپی از نرم‌افزار آلتیوم<sup>۵۲</sup> استفاده شده است. در این قسمت بخش‌های مختلف این برد بررسی و هر قسمت تشریح خواهد شد. به‌طور کلی برد از سه بخش کلی تشکیل شده است: مدار تغذیه، مدار آنالوگ تایмер و مدار میکروکنترلر.

### ۱-۵-۳-۲- مدار تغذیه

در مدار تغذیه، ولتاژ DC با استفاده از یک آداپتور معمولی به برد داده خواهد شد. ولتاژ آداپتورهای معمول ۱۲ ولت است لذا برای استفاده از این ولتاژ در اجزای مختلف مدار باید با استفاده از رگولاتور سطح این ولتاژ را تغییر داد. در مدار طراحی شده دو نوع ولتاژ ۵ ولت و ۳.۳ ولت به عنوان V<sub>CC</sub> آی‌سی‌ها مورد استفاده خواهد بود. به همین منظور از دو نوع رگولاتور L7805 و AMS1117 استفاده خواهد شد.



شکل ۴۷: شماتیک خلاصه مدار تغذیه

همانطور که در شکل ۴۷ مشاهده می‌شود تغذیه ورودی با استفاده آداپتور به برد وصل می‌شود سپس با استفاده از دو رگولاتور نام برد به سطح ولتاژ مورد نظر تقلیل پیدا می‌کند. در مدار فوق از یک فیوز و یک دیود برای محافظت بیشتر مدار از نوسانات برق و احیاناً بر عکس وصل کردن کابل اداپتور استفاده شده است.

دو رگولاتور نامبرده از معروف‌ترین و مورد استفاده‌ترین مدل‌های رگولاتورهای موجود در بازار می‌باشد.

به همین منظور در ادامه مروری بر عملکرد این دو نوع مدل خواهد شد.

وجود یک منبع تغذیه تنظیم شده برای دستگاه‌های الکترونیکی بسیار ضروری است، زیرا مواد نیمه‌هادی به کار رفته در آن‌ها جریان و ولتاژ کاری مشخصی دارند و در صورت وجود اختلاف با مقدار نامی، دستگاه آسیب خواهد دید. یکی از منابع مهم تأمین

<sup>۵۱</sup> PCB

<sup>۵۲</sup> Altium Designer

ولتاژ و جریان DC باتری‌ها هستند. اما استفاده از باتری در مدارهای حساس الکترونیکی ایده خوبی نیست، زیرا باتری‌ها در نهایت تخلیه می‌شوند و با گذشت زمان ولتاژ آن‌ها کاهش می‌یابد. رگولاتورهای ولتاژ گزینه‌های مناسبی برای تأمین ولتاژ مدار هستند. در این آموزش، ابتدا معیارهای انتخاب یک رگولاتور ولتاژ مناسب را بیان کرده، سپس یکی از رایج‌ترین آی‌سی‌های رگولاتور ۵ ولت معرفی می‌شود. این آی‌سی رگولاتور ولتاژ 7805 نام دارد.

برای انتخاب رگولاتور مناسب، باید عوامل مختلفی در نظر گرفته شود. در ادامه هریک از این عوامل معرفی می‌شود.

### • ولتاژ ورودی و ولتاژ خروجی

اولین گام برای انتخاب رگولاتور ولتاژ، دانستن ولتاژ ورودی و ولتاژ خروجی است که با آن کار خواهدید کرد. ولتاژ ورودی رگولاتورهای ولتاژ خطی باید بزرگ‌تر از ولتاژ خروجی نامی آن‌ها باشد. اگر ولتاژ ورودی کمتر از ولتاژ خروجی مورد نظر باشد، ولتاژ خروجی کمتر از میزان مورد انتظار خواهد شد و خروجی تنظیم‌نشده خواهد بود.

به عنوان مثال، اگر از یک رگولاتور ولتاژ ۵ ولت با ولتاژ دراپ اوت<sup>۵۳</sup> یا همان افت ولتاژ برابر با ۲ ولت استفاده می‌کنید، ولتاژ ورودی باید حداقل برابر با ۷ ولت برای یک خروجی تنظیم‌شده باشد. ولتاژ ورودی کمتر از ۷ ولت منجر به ولتاژ خروجی تنظیم‌نشده می‌شود.

رگولاتورهای ولتاژ برای دامنه ولتاژ ورودی و خروجی مختلف در دسترس هستند. به عنوان مثال، برای Arduino Uno به یک رگولاتور ولتاژ ۵ ولت و برای ESP8266 به یک رگولاتور ولتاژ ۳.۳ ولت نیاز دارید. حتی می‌توانید از یک رگولاتور ولتاژ متغیر استفاده کنید که خروجی‌های متنوعی را تولید می‌کند.

### • ولتاژ دراپ اوت یا افت ولتاژ

ولتاژ دراپ اوت تفاوت ولتاژ ورودی و خروجی رگولاتور ولتاژ است. به عنوان مثال، حداقل ولتاژ ورودی آی‌سی 7805 برابر با ۷ ولت و ولتاژ خروجی آن ۵ ولت است، بنابراین ولتاژ دراپ اوت آن ۲ ولت خواهد بود. اگر ولتاژ ورودی کمتر از ۷ ولت (مجموع ولتاژ خروجی و ولتاژ دراپ اوت) شود، منجر به یک خروجی غیرمجاز می‌شود که می‌تواند به مدار آسیب برساند. بنابراین، قبل از انتخاب رگولاتور ولتاژ، ولتاژ دراپ اوت آن را بررسی کنید.

ولتاژ دراپ اوت برای رگولاتورهای مختلف متفاوت است. به عنوان مثال، شما می‌توانید طیف وسیعی رگولاتور ۵ ولت را با ولتاژ دراپ اوت متفاوت پیدا کنید. رگولاتورهای خطی وقتی با ولتاژ خروجی ورودی بسیار کم کار می‌کنند، بسیار کارآمد هستند. بنابراین اگر از باتری به عنوان منبع تغذیه استفاده می‌کنید، می‌توانید برای کارایی بهتر از رگولاتورهای با افت ولتاژ کم یا LDO استفاده کنید.

### • توان مصرفی

رگولاتورهای خطی نسبت به رگولاتورهای سوئیچینگ توان بیشتری را اتلاف می‌کنند. اتلاف زیاد توان باعث تخلیه باتری، گرم شدن بیش از حد یا آسیب رساندن به محصول می‌شود. بنابراین اگر از رگولاتور ولتاژ خطی استفاده می‌کنید، ابتدا اتلاف توان را محاسبه کنید. اتلاف توان رگولاتورهای خطی را می‌توان با استفاده از فرمول زیر به دست آورد:

$$\text{جریان} \times (\text{ولتاژ خروجی} - \text{ولتاژ ورودی}) = \text{توان}$$

<sup>۵۳</sup> Dropout Voltage

برای جلوگیری از مشکل اتلاف توان می‌توانید از رگولاتورهای ولتاژ سوئیچینگ به جای رگولاتورهای ولتاژ خطی استفاده کنید.

- کارایی

بازده نسبت توان خروجی به توان ورودی و متناسب با نسبت ولتاژ خروجی به ولتاژ ورودی است. بنابراین بازده رگولاتورهای ولتاژ مستقیماً توسعه ولتاژ افت و جریان خاموشی<sup>54</sup> محدود می‌شود، زیرا هرچه ولتاژ دراپ اوت بیشتر باشد، بازده کمتر است. برای بازده بالاتر، ولتاژ دراپ اوت و جریان خاموشی باید به حداقل برسد و اختلاف ولتاژ بین ورودی و خروجی به کمینه شود.

- دقت ولتاژ

دقت کلی یک رگولاتور ولتاژ به تنظیم خط، تنظیم بار، رانش<sup>55</sup> ولتاژ مرجع، رانش ولتاژ تقویت‌کننده خطأ و ضریب دما بستگی دارد. مشخصه ولتاژ خروجی رگولاتورهای خطی رایج به گونه‌ای است که تضمین می‌کند خروجی تنظیم شده در ۵ درصد مقدار نامی باشد. بنابراین اگر از رگولاتور ولتاژ برای تغذیه آسی‌های دیجیتال استفاده می‌کنید، ترانس ۵ درصد طبیعی است.

- تنظیم بار

تنظیم بار به عنوان توانایی مدار در حفظ ولتاژ خروجی مشخص برای بارهای مختلف تعریف می‌شود. تنظیم بار به صورت زیر بیان می‌شود:

$$\Delta V_{\text{out}} / \Delta I_{\text{out}}$$

- تنظیم خط

تنظیم خط به عنوان توانایی مدار برای حفظ ولتاژ خروجی مشخص در شرایط تغییر ولتاژ ورودی تعریف می‌شود. فرمول تنظیم خط به صورت زیر است:

$$\Delta V_{\text{out}} / \Delta V_{\text{in}}$$

برای انتخاب یک رگولاتور ولتاژ مناسب، باید همه عوامل فوق را در نظر داشته باشید.

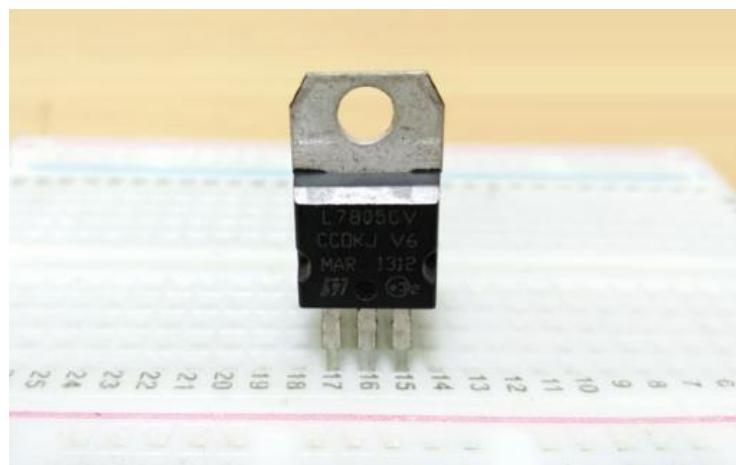
همان‌طور که می‌دانیم، ولتاژ باتری‌ها معمولاً ۱،۰، ۳، ۷، ۹ و ۱۲ ولت است. برای مدارهایی که ولتاژ مورد نیازشان با این مقادیر منطبق است، مشکلی وجود ندارد. اما اغلب آسی‌های TTL با ولتاژ ۵ ولت کار می‌کنند و بنابراین به ساز و کاری برای تأمین این ۵ ولت نیاز داریم. اینجاست که رگولاتور ۵ ولت به کار می‌آید و رایج‌ترین آن نیز مدل 7805 است. این رگولاتور ۵ ولت یک آسی‌سی از خانواده رگولاتورهای ولتاژ خطی 78 است که ۵ ولت تنظیم شده را به عنوان خروجی تولید می‌کند.

رگولاتور 7805 یک آسی‌سی رگولاتور ولتاژ خطی سه‌سر با ولتاژ خروجی ۵ ولت است که در موارد بسیار زیادی از آن استفاده می‌شود. امروزه آسی‌سی رگولاتور ولتاژ 7805 را تولید‌کنندگانی مانند Texas Instruments و شرکت ST تولید و به بازار عرضه می‌کنند.

این رگولاتورها در چندین بسته IC مانند TO-220، SOT-223، TO-263 و TO-3 در دسترس هستند. از بین این موارد، بسته TO-220 بیشتر مورد استفاده قرار می‌گیرد. [15]

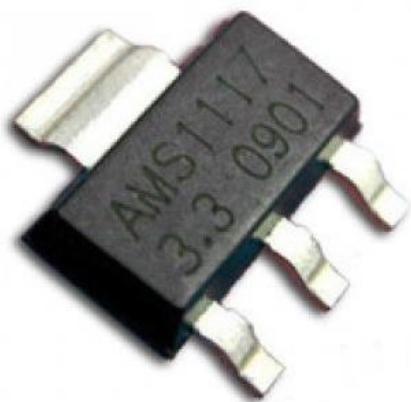
<sup>54</sup> Quiescent Current

<sup>55</sup> Drift



شکل ۴۸: رگولاتور ۵ ولت [15]L7805

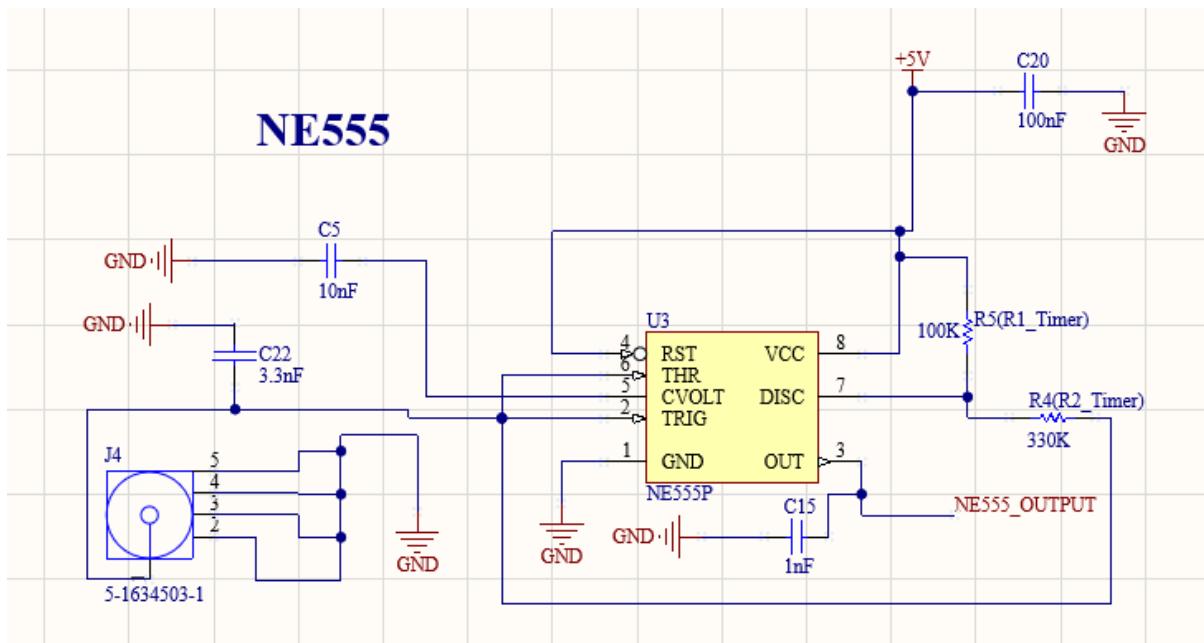
برای تغذیه میکروکنترلر سطح ولتاژ ۳.۳ ولت نیاز هست. پس از رساندن سطح ولتاژ به ۵ ولت با استفاده از رگولاتور ۷۸۰۵ با استفاده رگولاتور AMS1117-3.3 سطح ولتاژ به ۳.۳ ولت برای استفاده در میکروکنترلر رسانده می شود.



شکل ۴۹: رگولاتور ۱۱۱۷، ۳.۳ ولت

#### ۲-۵-۳-۲ - مدار آنالوگ

در بخش ۱-۳-۲-۱ مدار آنالوگ، مفصل مدار تایмер ۵۵۵ بررسی شد. حال به بررسی شماتیک مدار طراحی شده پرداخته خواهد شد. آی‌سی‌های مختلفی وجود دارد یکی از معروف ترین این آی‌سی‌ها NE555 است که در این برد از این مدل استفاده شده است.



شکل ۵۰: شماتیک مدار تایمر ۵۵۵

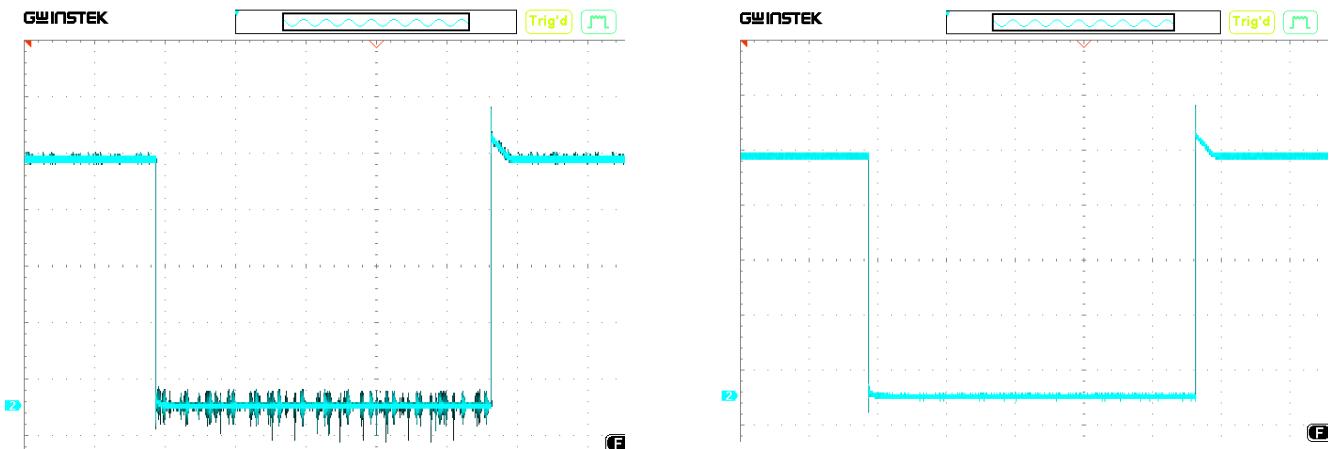
همانطور که در شکل بالا مشاهده می‌شود، آی‌سی NE555 به عنوان تایмер قرار داده شده است. یک کانکتور BNC در سمت چپ شماتیک دیده می‌شود که کابل کواکسیال گفته شده در بخش‌های قبل از این طریق به برد متصل می‌گردد. دو مقاومت R1 و R2 که به عنوان دشارژ آی‌سی استفاده می‌شود نیز دیده می‌شود. البته بنا به شرایطی که در تست‌های اولیه مدار ممکن است با آن مواجه شد ممکن از اندازه آن مقاومت دچار تغییراتی شود.



شکل ۵۱: کانکتور BNC روبردی [3]

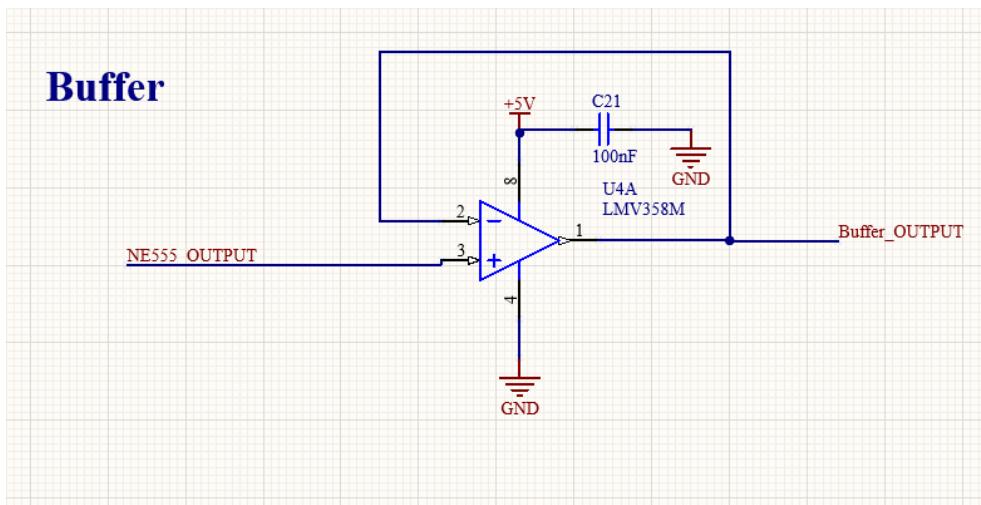
خازن‌هایی که در شکل دیده می‌شود، خازن‌هایی هستند که برای نویزگیری و شارپ‌کردن سیگنال خروجی استفاده شده است تا سیگنال خروجی از تایмер شارپ‌تر و بیشتر به پالس مربعی نزدیک باشد.

در شکل زیر اثر قراردادن یک خازن  $1nF$  بصورت موازی بعد از سیگنال خروجی از اسیلاتور را مشاهده می‌شود.



شکل ۵۲: اثر قراردادن خازن بعد از سیگنال خروجی تایمر

ممکن از سطح خروجی آی‌سی دچار نوسانات یا اسپایک‌هایی شود، همان‌طور که در شکل فوق می‌بینید، برای همین یک مدار بافر<sup>۵۶</sup> با استفاده از آپ‌امپ<sup>۵۷</sup> طراحی کرده تا در صورت وجود چنین اسپایک‌هایی به میکروکنترلر آسیبی وارد نشود. برای طراحی این بافر از آی‌سی LMV358 استفاده می‌کنیم. این قطعه اس‌ام‌دی، دو مزیت دارد: اول آنکه برای تغذیه نیازمند ولتاژ منفی نیست و با  $+5V$  راهاندازی می‌شود؛ دوم آنکه بدليل rail to rail بودن پس از خروج سیگنال از بافر، سطح ولتاژ سیگنال دچار افت قابل توجهی نمی‌شود. آمپ‌امپ‌هایی که از این خانواده نباشند ممکن است تا  $1.5V$  افت از سطح ولتاژ سیگنال ورودی داشته باشند.



شکل ۵۳: شماتیک مدار بافر

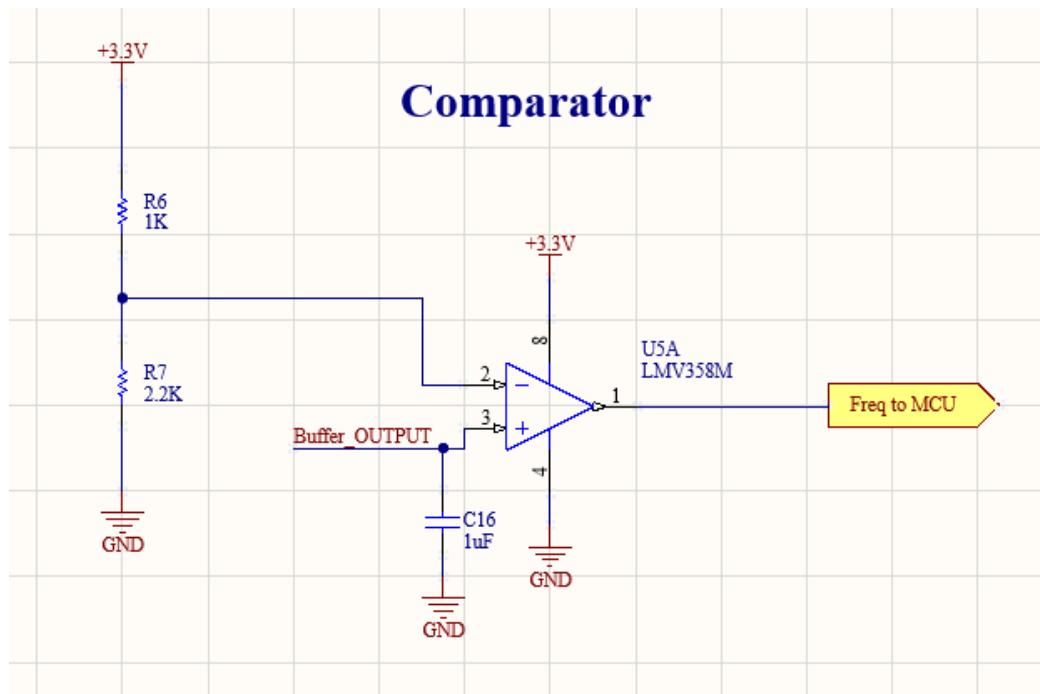
یکی دیگر از نکات مهم سطح منطقی ولتاژ سیگنال است. سطح ورودی به میکروکنترلهای ARM  $3.3V$  ولت می‌باشد. در حالی که سطح سیگنال خروجی از اسیلاتور بین  $0V$  و  $5V$  ولت نوسان می‌کند. به همین علت برای تغییر این سطح ولتاژ یک مدار مقایسه‌کننده با استفاده از آپ‌امپ طراحی کرده تا سطح ولتاژ پالس مربعی را بدون تغییر شکل مدار بین  $0V$  و  $3.3V$  ولت قرار دهد.

<sup>56</sup> Buffer

<sup>57</sup> Op-Amp

این مدار کمک می‌کند تا سطح خروجی سیگنال شارپ‌تر و مربعی تر شود و بدون نویز و اغتشاش وارد میکروکنترلر شود.  
در این مدار استفاده از یک تقسیم مقاومتی، سطح منطقی ولتاژ ۳.۳ ولت را در خروجی آپ‌امپ می‌سازد.

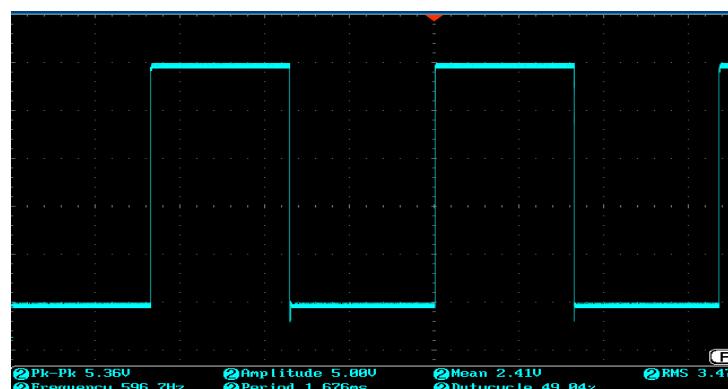
در شکل‌های زیر شماتیک مدار مقایسه‌کننده طراحی شده در برد و همچنین مقایسه اثربخشی این مدارها بر سیگنال در اسیلوسکوپ مشاهده خواهد شد.



شکل ۵۴: شماتیک مدار مقایسه‌کننده



شکل ۵۵: آپ‌امپ LMV358



شکل ۵۶: خروجی سیگنال اسیلاتور پس از Buffer

### ۳-۵-۳-۲ - مدار میکروکنترلر

شاید مهم‌ترین مدار این برد، مدار میکروکنترلر باشد که به عنوان قلب و پردازشگر اصلی عمل می‌کند. اول از همه به انتخاب نوع میکروکنترلر پرداخته و سپس به بررسی مدارهای این میکرو پرداخته خواهد شد. البته مدارات یک میکرو، شامل موارد متعددی است که بسیار جزئی است و در این مجال نمی‌گنجد فلذا در این قسمت خلاصه شماتیک بررسی می‌شود و مدار کامل و با جزئیات در ضمایم قرار خواهد گرفت.

شاید در نگاه اول میکروکنترلر مورد استفاده در این حسگر، نیازمند توانایی بالایی نباشد و با ساده‌ترین میکروهای بازار قابل انجام باشد. شاید با میکروکنترلر ساده‌ای مانند ۸۰۵۱ نیز بشود این پردازش را انجام داد. اما هدف داشتن سرعت و دقت بالا در پردازش است. همچنین به قابلیتی نیاز هست که فقط در تایمرهای میکروکنترلر خانواده ARM پیدا می‌شود. از طرفی شاید در آینده به این حسگر قابلیت‌های دیگری نیز افزوده شود که آن وقت اهمیت میکرو بیش از پیش احساس شود. پس در مقایسه با میکروکنترلرهای ۸ بیتی خانواده AVR و یا حتی میکرو محبوب آردوبینو ترجیح استفاده از خانواده ARM باشد. البته بحث انتخاب میکروکنترلر بحث مفصلی است که نیازمند بررسی دقیق قابلیت‌ها و جزئیات ساختار و طراحی داخلی این پردازشگرها می‌باشد که از مجال این گزارش خارج است. اما مروری مختصر بر قابلیت‌های میکروهای مختلف موجود در بازار ایران خواهد شد تا اهمیت انتخاب نوع میکروکنترلر مشخص شود.

میکروکنترلر آی‌اسی‌هایی که قابل برنامه‌ریزی می‌باشد و عملکرد آن‌ها از قبل تعیین شده‌است را میکروکنترلر گویند، میکروکنترلرها دارای ورودی – خروجی و قدرت پردازش می‌باشد.

این آی‌اسی‌ها حکم یک کامپیوتر در ابعاد کوچک و قدرت کمتر را دارند بیشتر این آی‌اسی‌ها برای کنترل و تصمیم گیری استفاده می‌شود چون طبق الگوریتم برنامه‌ی آن عمل می‌کند این آی‌سی‌ها برای کنترل ربات‌ها تا استفاده در کارخانه صنعتی کاربرد دارد. امکانات میکرو کنترلرها یکسان نیست و هر کدام امکانات خاصی را دارا می‌باشند و در قیمت‌های مختلف عرضه می‌شود.

بخش‌های مختلف میکروکنترلر از بخش‌های زیر تشکیل شده‌اند:

- واحد پردازش<sup>۵۸</sup>
- واحد محاسبات<sup>۵۹</sup>
- ورودی‌ها و خروجی‌ها<sup>۶۰</sup>
- حافظه اصلی میکرو<sup>۶۱</sup>
- حافظه‌ای که برنامه روی آن ذخیره می‌گردد<sup>۶۲</sup>
- تایمرها<sup>۶۳</sup>

#### خانواده‌های میکروکنترلر

از میکروکنترلرهای رایج در ایران، می‌توان به خانواده‌های AVR، PIC، ARM، 8051 اشاره کرد، که خانواده AVR از محبوبیت بالایی نسبت به دیگر خانواده‌های میکروکنترولر برخوردار است. در این بخش قصد داریم تا شما را بصورت مختصر با ویژگی‌ها و امکانات این میکروکنترولرها آشنا کنیم. [16]

<sup>58</sup> CPU

<sup>59</sup> AIU

<sup>60</sup> I/O

<sup>61</sup> RAM

<sup>62</sup> ROM

<sup>63</sup> Timer

## خانواده AVR

میکروکنترلرهای AVR محصول شرکت Atmel می‌باشند که از میکرووهای پرمصرف در بازار برق و الکترونیک هستند. این میکروها در کاربردهای گوناگون در صنعت و پروژه‌های دانشگاهی و تحقیقاتی استفاده زیادی دارند البته به خاطر فرکانس پایین این نوع میکروها در صنعت و پروژه‌های حساس بالا از این میکروکنترلرهای استفاده کمتری می‌شود.

این خانواده از میکروکنترولرهای دارای چهار زیرمجموعه اصلی می‌باشند:

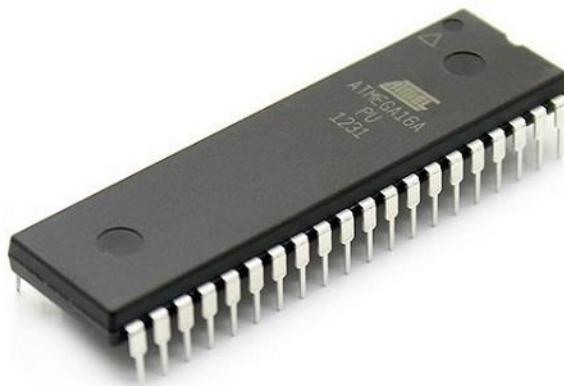
- ۱ - سری AT90S (سری کلاسیک)
- ۲ - سری ATtiny
- ۳ - ATmega
- ۴ - سری ATXmega (سری جدید)

فناوری استفاده شده در ساخت این میکروکنترلرهای شامل RISC و CISC می‌باشد که در معماری RISC دستورات سریع‌تر اجرا می‌شوند اما نوشتن برنامه مشکل‌تر است. در معماری CISC دستورات پیچیده ولی نوشتن برنامه در این معماری آسان‌تر است.

برنامه نویسی تمامی میکروکنترلرهای AVR به زبان C و بیسیک صورت می‌گیرد که برای هر کدام از زبان‌های برنامه نویسی کامپایلرهایی وجود دارد. از جمله کامپایلرهای معروف برای زبان C نرم افزار CodeVision AVR و برای برنامه نویسی به زبان بیسیک معمولاً از نرم افزار BASCOM Avr استفاده می‌شود. تمامی برنامه‌های نوشته شده در این کامپایلرهای برای تمام میکروکنترلرهای Atmel به شیوه یکسان ولی با رجیسترها و ثبات‌های متفاوتی می‌باشند. که برای برنامه نویسی این میکروکنترلرهای باید به دیتاشیت مخصوص آن میکرو مراجعه کرد.

## امکانات:

میکروکنترلرهای AVR دارای امکانات و ویژگی‌های خاصی هستند که معمولاً در دیگر میکروها نیز استفاده می‌شود از امکانات این میکروها می‌توان به قابلیت استفاده از تایمرباکس، واحد آنالوگ به دیجیتال ADC ، سیستم ریست نرم افزاری، مقایسه کننده آنالوگ، رابط سریال USART ، رابط سریال دو سیم TWI ، وقفه‌ها، Boot Loader، JTAG و برنامه اشکال زدایی Debug ، مدیریت توان، ارتباط از طریق پورت USB ، کارت‌های حافظه MMC/SD ، صفحه نمایش‌های گرافیکی نام برد که هر کدام تنظیمات مخصوص به خودشان را دارند.



شکل ۱۶: میکروکنترلر ATmega

### خانواده PIC

شرکت microchip خانواده وسیعی از میکروکنترلرهای pic را در دستههای ۸ بیتی، ۱۶ بیتی و ۳۲ بیتی برای کاربردهای مختلف فراهم کرده است که این خانوادهها روز به روز در حال توسعه یافتن هستند. همین امر موجب محبوب بودن pic ها در صنعت میباشد.

#### سری میکروهای ۸ بیتی

##### سری ۱:

این سری قدیمی ترین سری از میکروکنترلرهای PIC می باشد اما سادگی کار با آنها و نیز ارزان بودن آنها باعث شده تا همچنان این میکروکنترلرها در صنعت باقی بمانند. البته microchip با توسعه میکروکنترلرهای این گروه همانطور که مشاهده می کنید سرعت اسیلاتور در خانواده pic10f حداقل ۱۶ مگاهرتز و در خانواده PIC12F نیز حداقل سرعت ۳۲ مگاهرتز در برخی مدلها می باشد.

##### سری ۲:

از این سری ۱۵۵ نوع میکروکنترل موجود است که نهایت سرعت اسیلاتور در آنها ۴۸ مگاهرتز می باشد.

##### سری ۳:

این سری قوی ترین و جدیدترین میکروکنترلرهای ۸ بیتی PIC می باشد و حدود ۲۲۰ میکروکنترلر از این سری ساخته شده است. سرعت در برخی از میکروکنترلرهای این سری تا ۶۴ مگاهرتز نیز می رسد که سرعت فوق العاده ای برای یک میکروکنترلر ۸ بیتی می باشد.

#### سری میکروهای ۱۶ بیتی:

این سری در دستههای pic24f,PIC24H,PIC24E,dsPIC30,dsPIC33F,dsPIC33E گروه بندی شده اند. از ویژگی های بارز این گروه که در میکروکنترلرهای ۸ بیتی وجود نداشت رابط CAN و USB وجود تایمراهی ۳۲ بیتی می باشد.

این سری دارای CPU با سرعت MIPS ۱۶ می باشد و سرعت فرکانس اسیلاتور در مدل های مختلف آن متفاوت است چنانچه در برخی مدل های جدید تا ۲۵۰ مگاهرتز هم می رسد اما به طور میانگین سرعت آنها با استفاده از حلقه های PLL تا ۹۶ مگاهرتز می باشد. در زمان نوشتمن این مقاله ۱۳۲ محصول از این خانواده موجود است.

##### سری ۲:

سرعت CPU در این دو سری نسبت به سری قبلی بهبود چشم گیری داشته و تا ۷۰ MIPS نیز می رسد البته کمترین سرعت نیز در این سری ۴۰ MIPS می باشد. تعداد میکروهای ساخته شده در این سری ۳۰ عدد می باشد.

##### سری ۳:

میکروکنترلرهای dsPIC به دلیل ویژگی های خاصی که دارند به میکروکنترلرهای پردازش سیگنال مشهور هستند سرعت CPU در این سری ۳۰ MIPS و تعداد محصولات این سری ۲۴ می باشد.

:۴ سری

تعداد این سری از میکروکنترلهای PIC به ۱۹۵ عدد می‌رسد و سرعت CPU نیز از ۱۶ MIPS به ۷۰ MIPS می‌رسد.

خانواده ۸۰۵۱

اولین میکروکنترلر ساخت دست بشر است که در ابتدا توسط شرکت بزرگ intel ساخته شد. اما بعدا intel این امکان را به دیگر شرکت‌ها داد که این میکروکنترلر را تولید کنند و شرکت‌هایی مانند ATMEL, PHILIPS, SIEMENS و ... که از بزرگ ترین شرکت‌های دنیا هستند به تولید این میکروکنترلر پرداختند یکی از شرکت‌هایی که به صورت گسترده به تولید این تراشه پرداخت ATMEL بود که مدل‌های مختلف میکروکنترلر را ساخت و محصولات آن در سراسر جهان و در ایران یافت می‌شود. اما زمانی که ما به صورت کلی سیر پیشرفت این نوع میکروکنترلر را در نظر می‌گیریم متوجه می‌شویم اولین میکروکنترلهایی که ساخته شد با جدیدترین میکروکنترلرهای ۸۰۵۱ که الان تولید می‌شود پیشرفت زیادی ندارد به طور مثال AT89S5X که میکروکنترلر ۸۰۵۱ ATMEL جدید ساخت است نسبت به مدل‌های اولیه ۸۰۵۱ پیشرفت آنچنانی ندارد. امکانات این میکرو نسبت به AVR و PIC قابل مقایسه نیست. به صورتی که همین مدل جدید ۸۰۵۱ تقریبا حافظه‌ای برابر یک صدم (۱۰۰۰۱) میکروکنترلر های AVR را دارد و سرعتش ۴ برابر کمتر از میکروکنترلر های PIC و ۱۲ بار کمتر از میکروکنترلر های AVR است. از لحاظ امکانات دیگر هم چنین ضعفی احساس می‌شود. اما برای کارهای ساده‌تر که پیچیدگی زیادی در آن نباشد به خاطر قیمت بسیار پایینی که این میکروکنترلر دارد بسیار مناسب است. قیمت همین مدل جدید AT89S5X حدود ۱۰۰۰ تومان است که قیمت بسیار مناسبی است.

این میکرو کنترلر از زبان اسمنلی و C پشتیبانی می‌کند که زبان برنامه نویسی اصلی آن اسمنلی است که نوشتن با این زبان برنامه نویسی نسبت به زبان‌های برنامه نویسی دیگر هم مشکل‌تر و هم طولانی‌تر است. در کل این میکروکنترلر امروزه دیگر توان رقابت با AVR و PIC را دارا نیست و رقابت اصلی بین این دو میکروکنترلر است.

خانواده ARM

با پیشرفت سیستم‌های توسعه یافته، میکروکنترلرهای ۸ و ۱۶ بیتی جوابگوی نیازهای این سیستم‌ها نمی‌باشند و به کارگیری میکروکنترلرهای ۳۲ بیتی به سرعت رو به افزایش است. در این میان میکروکنترلرهای ۳۲ بیتی خانواده ARM به دلیل مصرف توان اندک، سرعت پردازش زیاد و قیمت بسیار اندک نخستین انتخاب موجود می‌باشد. به همین دلیل امروزه بسیاری از تولیدکنندگان بزرگ میکروکنترلرها، در طیف وسیعی از تولیدات خود از هسته‌های پردازنده ARM استفاده می‌کنند. میکروکنترلرهای ARM با پیاده‌سازی اجزای مختلفی از قبیل ارتباط‌های CAN, USB, Ethernet در داخل تراشه، نیاز به استفاده از المان‌های خارجی را تا حد زیادی کاهش می‌دهند، از سوی دیگر معماری ۳۲ بیتی آن‌ها این امکان را فراهم می‌آورد که زبان‌های سطح بالا از قبیل C و C++ به منظور برنامه نویسی این تراشه‌ها مورد استفاده قرار گیرند.

سیستم عامل‌های بلادرنگ (RTOS) و کتابخانه‌های متعددی جهت کار با این تراشه ارائه شده‌اند، که امکان استفاده از آن‌ها را بدون درگیر شدن با جزئیات داخلی و رجیسترها تراشه ممکن می‌سازد Symbian OS, Linux, Windows CE نمونه‌ای از سیستم‌های عامل بلادرنگ رایج در سیستم‌های توسعه یافته می‌باشند. همچنین کتابخانه TCP/IP که توسط بسیاری از تولیدکنندگان میکروکنترلرهای ARM، به صورت رایگان ارائه می‌شود، امکان اتصال این تراشه‌ها به شبکه را بدون درگیر شدن کاربر با لایه‌های پایین شبکه فراهم می‌آورد.

معماری میکروکنترلرهای ۳۲ بیتی ARM غالباً بر پایه هسته‌های ARM7, ARM9, Cortex-M3 استوار می‌باشد. تراشه‌های ARM9 دارای سرعت پردازش بیشتری در مقایسه با انواع ARM7 می‌باشند و معماری آن‌ها به منظور استفاده از سیستم‌های عامل بلادرنگ از قبیل Linux, Windows CE بهینه سازی شده است. اما اغلب پردازنده‌های ARM9 قادر حافظه کد داخلی می‌باشند و از واحد مدیریت حافظه (MMU) به منظور ارتباط با حافظه‌های خارجی از قبیل SDram و Nand Flash استفاده می‌کنند برخلاف میکروکنترلرهای ARM7 که برنامه کاربر در حافظه Flash داخلی تراشه ذخیره و اجرا می‌شود. همچنین مصرف میکروکنترلرهای ARM9 به طور معمول بیشتر از انواع ARM7 می‌باشد.

امروزه میکروکنترلرهای ARM توسط شرکت‌های متعددی همچون Acron, Analog Devices, Atmel, Cirrus, Epson, Freescale, Hilscher, Intel, Luminary, Micronas, Marvell, Netsilicon, NXP (by Philips), OKI, Samsung, ST Micro, Texas Instruments, Winbond ساخته می‌شوند.

یکی از مواردی که عموماً در انتخاب میکرو مورد توجه قرار می‌گیرد، پشتیبانی میکرو از پروتکل‌های ارتباطی است. در این میان میکروکنترلرهای ARM از بیش ترین پروتکل‌های موجود پشتیبانی می‌کنند. پروتکل‌هایی که عموماً در ایران استفاده می‌شود عبارتند از USB, RS232, SPI, I2C, CAN, Ethernet و... هستند که میکروکنترلرهای خانواده ARM از این پروتکل‌ها به اضافه چند پروتکل دیگر که در ادامه توضیح داده می‌شود پشتیبانی می‌کنند و تمامی آن‌ها به صورت یکجا در خود دارند (مثلًا میکروکنترلر AT91SAM7X256 از خانواده ARM این پروتکل‌ها پشتیبانی می‌کند اما میکروکنترلرهای AVR فقط از چهار مورد پشتیبانی می‌کند).

## روش انجام پروژه

با توجه به مطالبی که بالا گفته شد، استفاده از خانواده میکروکنترلر ARM انتخاب می‌شود. همچنین ترجیح این پروژه با توجه به کاربرد و برتری‌های قسمت تایمر در میکروهای شرکت ST نسبت شرکت فیلیپس، استفاده از میکروکنترلرها STM32 می‌باشد. حال به انتخاب مدل دقیق این میکرو پرداخته خواهد شد.



شکل ۵۸: معرفی کامل انواع میکروکنترلرهای شرکت ST [21]

در شکل بالا تمامی انواع میکروهای شرکت ST دیده می‌شود. با توجه به نیازها و سرعت کاری حسگر، میکروکنترلرها گروه F1 انتخاب می‌شود. بین انواع میکروکنترلرهای این گروه با توجه فرکانس کاری میکرو مدنظر از خانواده Mainstream F1 می‌باشد.

The table compares the STM32F1 series based on various features:

	Product line	FCPU (MHz)	Flash (Kbytes)	RAM (Kbytes)	USB 2.0 FS	USB 2.0 FS	FSMC	CAN 2.0B	3-phase MC Timer	PS	SDIO	Ethernet IEEE1588	HDMI CEC
- 40 to 105°C range - USART, SPI, I²C - 16- and 32-bit timers - Temperature sensor - Up to 3x12-bit ADC - Dual 12-bit ADC - Low voltage 2.0 to 3.6V (5V tolerant I/Os)	STM32F100 Value line	24	16 to 512	4 to 32			•		•				•
STM32F101	36	16 to 1M	4 to 80			•							
STM32F102	48	16 to 128	4 to 16	•									
STM32F103	72	16 to 1M	4 to 96	•	•	•	•	•	•	•			
STM32F105	72	64 to 256	64	•	•	•	•	•	•	•			
STM32F107													

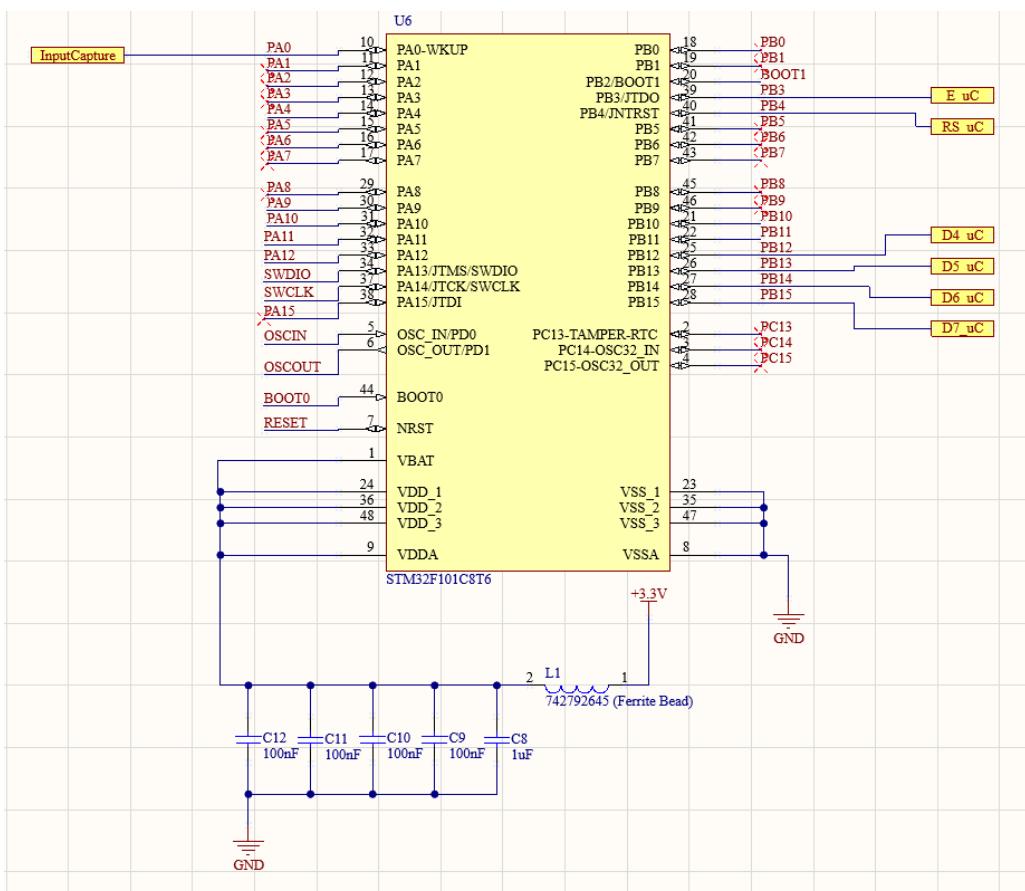
شکل ۵۹: مقایسه انواع گروههای خانواده F1 [21]

در خانواده F1 انواع مختلفی وجود دارد که بالاترین فرکانس کاری مربوط به گروه F103 می‌باشد. خود این گروه انواع مختلفی دارد که در حافظه فلاش و Ram و دما کاری اختلاف دارند که زیاد فرقی در کاربرد این پروژه ندارند. البته قیمت این میکروکنترلرها در انتخاب مدل دقیق اثر بسیاری دارد. پس بررسی‌های مختلف در بازار و بررسی قابلیت‌های مختلف میکروکنترلرها در نهایت انتخاب نهایی، میکروکنترلر STM32F103CBTx می‌باشد. پکیج مورد استفاده نیز پکیج حداقلی ۴۸ پایه می‌باشد.



شکل ۶۰: نمای میکروکنترلر STM32F103CBTx

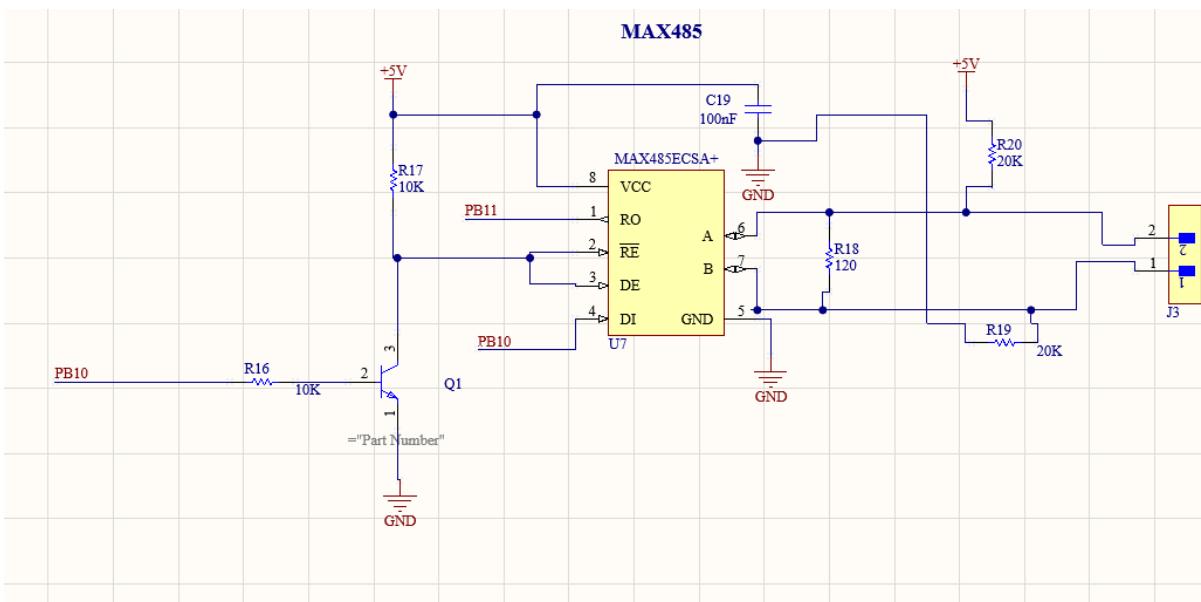
حال به بررسی شماتیک مدار طراحی شده برای میکروکنترلر پرداخته خواهد شد.



شکل ۶۱: شماتیک مدار میکروکنترلر stm32

در شکل فوق شماتیک مدار مشاهده می‌شود. در این شکل با استفاده از یک فریت بید<sup>۶۴</sup> و موازی کردن خازن‌ها جلوی وارد شدن نویز و اغتشاش به در سیگنال تغذیه میکروکنترلر گرفته می‌شود.

همان‌طور که مشاهده می‌شود تغذیه میکروکنترلر stm32 سطح منطقی ولتاژ ۳.۳ ولت می‌باشد. در قسمت سمت راست این شماتیک خروجی‌ها مفروض میکرو برای پایه‌های LCD کاراکتری در حالت ۴ بیتی را مشاهده می‌شود. همچنین پایه PA0 به عنوان پایه ورودی پالس از سمت خروجی مدار آنالوگ تعیین شده است. این پایه روی حالت Input Capture یکی از تایم‌رها قرار دارد. در شکل زیر مدار ارتباط میکروکنترلر با کامپیوتر با استفاده از پروتکل ارتباطی RS485 می‌شود. در این ارتباط با استفاده از آی‌سی max485، سیگنال خروجی میکرو را به ttl تبدیل کرده و سپس با استفاده از یک کابل دو رشته تا ۳۰ متر قابلیت انتقال این سیگنال وجود دارد و با استفاده از یک مبدل ttl to usb این سیگنال به کامپیوتر وصل می‌شود.



شکل ۶۲: شماتیک مدار MAX485

پیکربندی اولیه میکروکنترلر stm32، الزامات خاصی دارد و باید مدارهای دیگری نیز طراحی شود. مث مدار کریستال میکرو که فرکانس کاری میکرو را با استفاده از یک کریستال خارجی تامین کند و یا مدار SWD برای پروگرام کردن میکروکنترلر یا مدار بوت‌لودر<sup>۶۵</sup> که نقش بوت کردن حافظه‌های مختلف میکرو را بازی می‌کند. که خروجی‌های مربوطه را در شکل ۶۱ مشاهده می‌کنید. همچنین جزئیات مدارها با بطور کامل در قسمت ضمائم قرارداده شده است.

حال که طراحی شماتیک مدارهای موجود در برد الکترونیکی تمام شد به بررسی طراحی PCB مورد بحث پرداخته خواهد شد. در این قسمت جانمایی قطعات و سیم‌کشی بین قطعات انجام شده است.

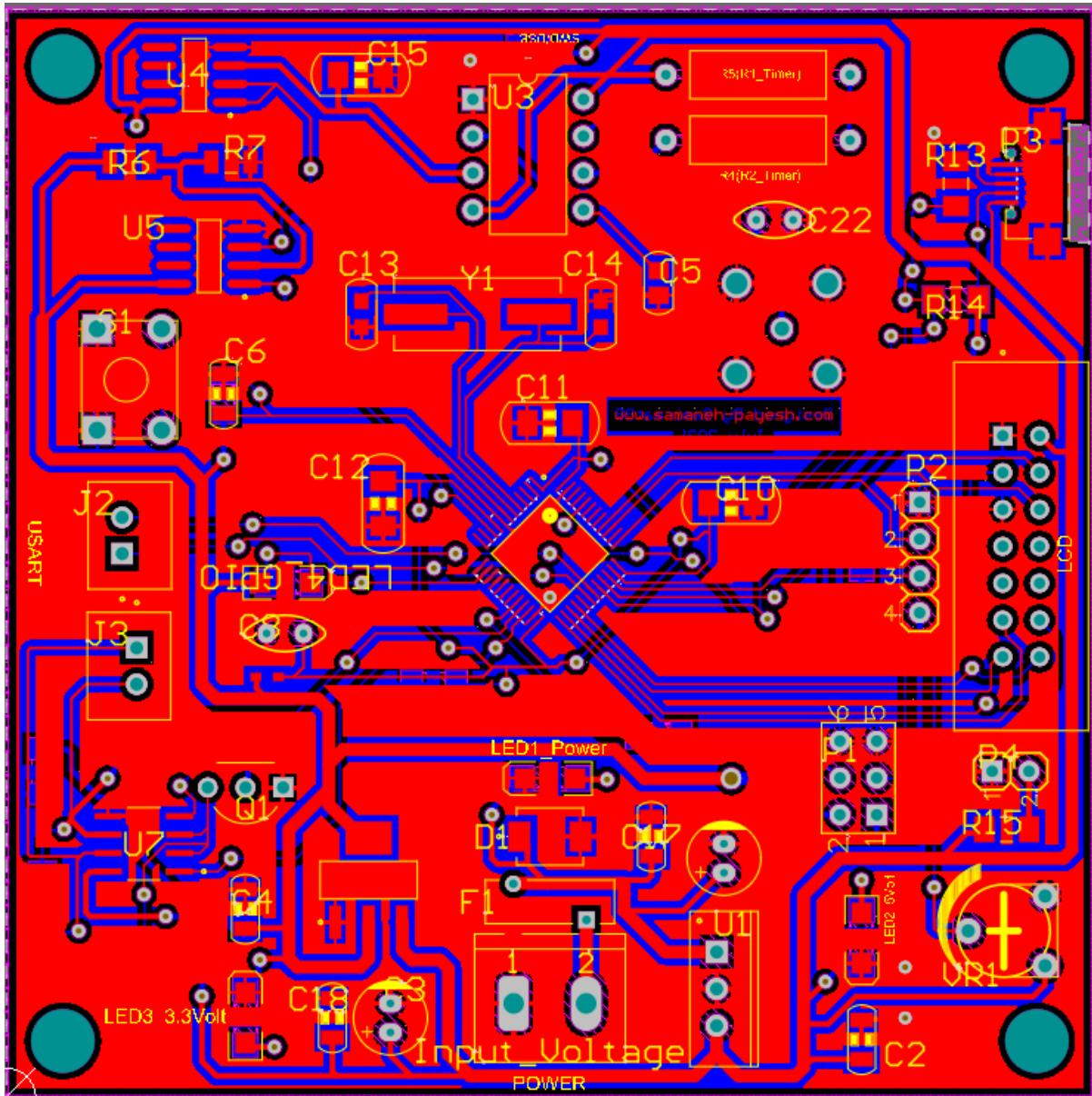
در این برد یک برد دولاپیه طراحی شده است. ابعاد برد ۷.۵ در ۷.۵ سانتی متر می‌باشد که البته ابعاد برد بعد از جانمایی قطعات و با توجه به ساختار مکانیکی طراحی شده تعیین گردید. در این برد تا جایی که ممکن بود از قطعات پکیج SMD استفاده شده است تا کمترین فضای ممکن و یک لایه را اشغال کند. سیم‌کشی بین قطعات نیز با استفاده از via ها بین لایه‌ها انجام

<sup>۶۴</sup>Ferrite Bead

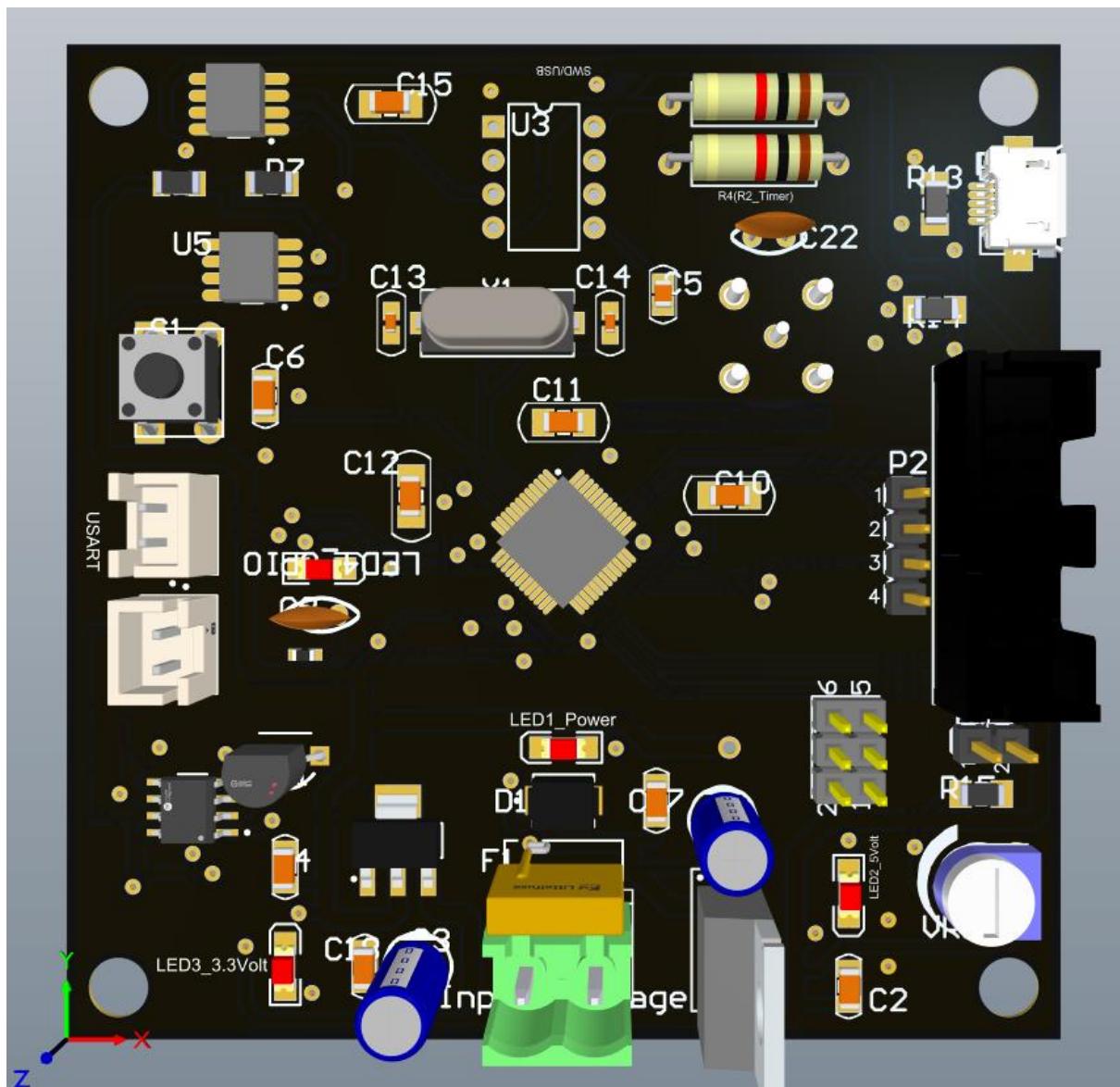
<sup>۶۵</sup> Boot Loader

شد. قطر ترکهای تغذیه ۱ میلیمتر و قطر ترکهای سیگنال ۰.۳۰ میلیمتر در نظر گرفته شد. البته این قطر کمتر هم میشد طراحی شود که با توجه به هزینه چاپ برد، صرفه اقتصادی نداشت.

در شکل‌های زیر نمایه‌هایی از قسمت‌های مختلف این برد مشاهده می‌شود در قسمت ضمائم نیز کامل قرار داده شده است.



شکل ۶۳: نمای دو بعدی PCB طراحی شده



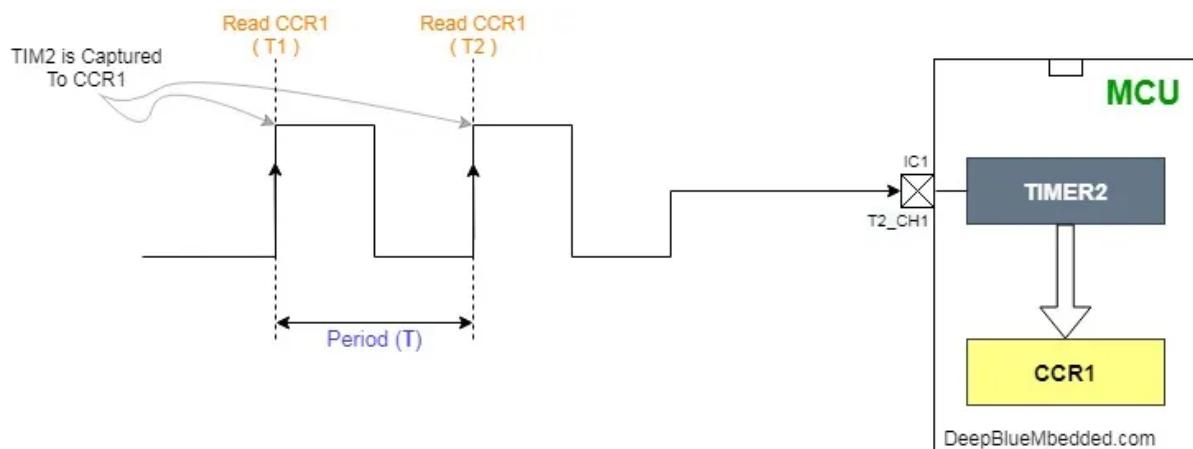
شکل ۶۴: نمای سه بعدی PCB طراحی شده

## ۴-۲- برنامه‌نویسی میکروکنترلر

در این بخش به بررسی برنامه نوشته شده برای میکروکنترلر stm32 پرداخته خواهد شد. مهم‌ترین کاری پردازشگر باید انجام دهد آن است که با استفاده از روشی فرکانس پالس تولیدی مدار آنالوگ را تشخیص دهد. پالس تولیدی مدار آنالوگ به ازای ظرفیت‌های مختلف خازن کابل کواکسیال، پالس با فرکانس متناظر تولید می‌کند و با تشخیص فرکانس این پالس در میکرو، ظرفیت متناظر آن پالس و تبع آن، ارتفاع آب درون مخزن متناظر آن خازن مشخص بdest خواهد آمد. پس از بدست آوردن فرکانس پالس، با استفاده از یکسری روش‌های ریاضی و آماری مانند میانگین‌گیری، دیتا بدست آمده را اصلاح‌افilter کرده و نویزها و داده‌های پرت حذف خواهد شد تا داده‌ای تمیز وجود داشته باشد. سپس با پیاده‌سازی فرمول‌های تئوری، ظرفیت و سپس ارتفاع آب مخزن بدست آورده می‌شود.

البته میکروکنترلر stm32 نیازمند پیکربندی خاصی برای راهاندازی اولیه است که با بحث کدنویسی رجستری<sup>۶۶</sup> مرتبط با این گزارش نیست و آن را بررسی نخواهیم کرد.

پس از راهاندازی اولیه میکروکنترلر stm32، به پیاده‌سازی کد تشخیص فرکانس پالس ورودی پرداخته خواهد شد.



شکل ۶۵: ورودی سیگنال به میکروکنترلر [22]

همانطور که در شکل فوق مشاهده می‌شود، سیگنال مربعی وارد یکی از پایه‌های تایمر میکروکنترلر در حالت Input Capture می‌شود. میکرو به محض اینکه یک Rising Edge تشخیص دهد، روتین وقفه خود را فعال می‌کند. در روتین وقفه با استفاده از کد نوشته شده، دو CCR تایمر خوانده و اختلاف زمانی مابین این دو با توجه فرکانس کاری میکرو که ۷۲ مگاهرتز است، محاسبه کرده و فرکانس پالس ورودی به میکرو بدست آورده می‌شود.

پس از محاسبه فرکانس پالس ورودی با استفاده از تئوری گفته شده در بخش مدار آنالوگ، با استفاده از توابع نوشته شده اقدام به محاسبه ظرفیت خازن متناظر با پالس و سپس با استفاده از تئوری بخش ۵-۲-۲- روابط حاکم بر حسگر سطح‌سنجه طراحی شده ارتفاع آب درون مخزن بدست آورده خواهد شد. پس مهم‌ترین نکته داشتن سیگنالی صاف و بدون نویز و اغتشاش بصورت مربعی و تشخیص دقیق فرکانس این سیگنال است. این مهم با توجه به الگوریتم گفته شده با دقت بسیار خوبی قابل دستیابی است. در ادامه با انجام یکسری پردازش‌های ریاضی روی دیتا بدست آمده مانند میانگین‌گیری و غیره، فرکانس خوانده شده پردازش بیشتری شده و داده‌ای دقیق‌تر وجود خواهد داشت.

<sup>۶۶</sup> registry

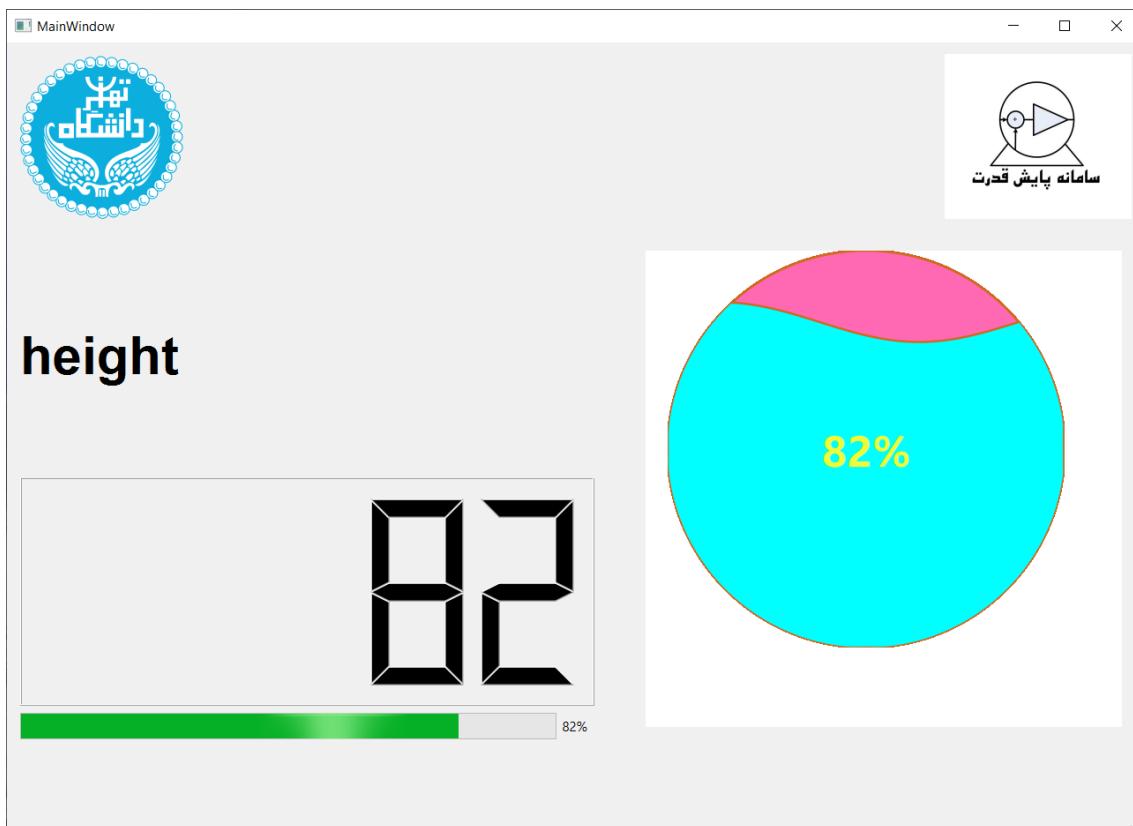
## ۲-۵-۲- نرم افزار مانیتورینگ

حال که ارتفاع آب درون مخزن در میکروکنترلر محاسبه شد، با استفاده از یک کابل دو رشته با استفاده از پروتکل RS485 بین میکروکنترلر و کامپیوتر ارتباط برقرار می‌شود. همانطور که گفته شد، پروتکل RS485 یک پروتکل ارتباطی صنعتی است که قادر است سیگنال را با استفاده از کابل دورشته براحتی تا ۳۰ متر منتقل کند. سپس با استفاده از یک ماژول از طریق USB به کامپیوتر وصل شود.



شکل ۶۶: ماژول تبدیل ارتباط RS485 به USB

پس آن که این ارتباط از طریق پورت COM کامپیوتر برقرار شد. دیتا ارسالی از طریق این پورت دریافت می‌شود. با استفاده از یک نرم افزار که با C++ نوشته شده است، این کار انجام شده و حسگر مانیتور از فریم‌ورک Qt استفاده می‌شود. این فریم‌ورک بر اساس زبان C++ نوشته شده است همچنین زبان QML بطور اختصاصی برای این فریم‌ورک توسعه داده شده است.



شکل ۶۷: نرم افزار مانیتورینگ طراحی شده برای حسگر

این نرم افزار بصورت آزمایشی برای یک مخزن ۱ متری طراحی شده است. همانطور که مشخص است ظاهر گرافیکی این برنامه بسیار ساده است و زیبایی ظرایحی ندارد که در مجال این پروژه نمی‌گنجد اما UI این برنامه و گرافیک و ظاهرش کار برای انجام دارد و باید در آینده روی آن کار شود. این برنامه صرفاً بصورت آزمایشی طراحی شده است.

# فصل ٣-نتائج

در این بخش به نتایج به دست آمده پرداخته خواهد شد. ابتدا راه اندازی آزمایشی این حسگر را بررسی خواهد شد و نتیجه ساختار مکانیکی و برد الکترونیکی طراحی شده دیده خواهد شد؛ سپس با قرار دادن حسگر داخل مخزن آب در ارتفاع های مختلف اقدام به داده برداری کرده و خروجی حسگر برای ارتفاع های مختلف ثبت خواهد شد. پس آن نوبت به کالیبراسیون حسگر می رسد که با استفاده از دیتا های جمع آوری شده با استفاده از روش حداقل مربعات رگرسیون، نمودار مشخصه این حسگر بدست آورده و اصطلاحا کالیبره می شود. پس از کالیبراسیون، دیگر مشخصه های این حسگر مانند آنالیز حساسیت، دقت، صحت و پسماند<sup>۶۷</sup> بررسی و تحلیل می شود. در انتهای نیز به بحث و جمع بندی و بررسی راه هایی برای بهبود این حسگر پرداخته خواهد شد.

### ۱-۳- راه اندازی آزمایشی

در شکل زیر نمای کلی از حسگر ساخته شده مشاهده می شود. قسمت فوقانی آن کیس محافظ است که پرینت سه بعدی شده است و درون آن برد الکترونیکی طراحی شده قرار دارد.



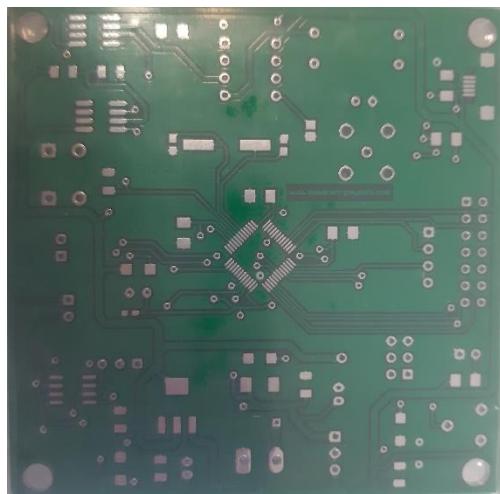
شکل ۶۸: نمای کلی حسگر حافظه ساخته شده

کابل کواکسیال RG59 با استفاده از گلنده به کیس محافظ وصل شده است و درون مخزن آب غوطه ور است. همچنین انتهای کابل نیز به وزنه استیل ساخته شده متصل است. وزنه نیز با استفاده از چسب اپوکسی و آکواریوم، نسبت به نفوذ آب مقاوم شده

<sup>67</sup> Hysteresis

است. وجود وزنه استیل سبب می‌شود هم کابل بطور صاف و مستقیم درون آب شناور بماند و هم ارتباط بین مغزی کابل و آب را برقرار می‌کند.

برد مدار چاپی طراحی شده یا همان PCB، پس از چاپ شدن، آماده اسambil کردن قطعات می‌شود. در شکل زیر روند انجام این مهم مشاهده می‌شود. پس از اسambil کردن قطعات این برد آماده نصب شدن روی کیس محافظ و استفاده در حسگر می‌باشد.



شکل ۶۹: برد مدار چاپی قبل از اسambil قطعات



شکل ۷۰: برد مدار چاپی بعد از اسambil قطعات

پس آنکه برد آماده استفاده شد، برنامه نوشته شده برای میکروکنترلر روی آن ریخته می‌شود یا اصطلاحاً به آن پروگرام کردن میکرو گفته می‌شود. حال با استفاده از یک آداتپتور ۱۲ ولت متداول و وصل کردن به کانکتور فونیکس تغذیه روی برد، حسگر آماده قرار گرفتن در مخزن آب مفروض می‌باشد.

## ۲-۳ - تست عملکرد کابل کواکسیال

در این بخش عملکرد خازنی کابل کواکسیال را بررسی خواهد شد. برای ارزیابی امکان سنجی طراحی، آزمایش هایی انجام شد تا بررسی شود که ظرفیت کابل کواکسیال PVC، تقریباً به طور خطی با سطح مایع درون مخزن، تغییر کرده اند. در حقیقت در این بخش بررسی خواهد شد که آیا ظرفیت خازن ساخته شده بوسیله کابل کواکسیال، نسبت به سطح آب درون مخزن تغییر خواهد کرد؟ و اگر آری، چه تفاوتی با تئوری حاکم دارد. به همین منظور این تست ها انجام خواهد شد. پس از آماده سازی تجهیزات آزمایشی نشان داده شده در شکل ۶۸، آب به آرامی به مخزن اضافه می شود. ظرفیت کابل کواکسیال PVC، به ازای هر یک سانتی متر افزایش سطح مایع در مخزن بوسیله دستگاه LCR متر ثبت می شود. برای تست و آزمایش یک مخزن ۷۵ سانتی متری تهیه شده است به همین منظور کابل کواکسیال نیز برای چنین مخزنی آماده شده است. در نتیجه ثبت داده ها، مجموعاً ۷۵ داده برای مقادیر خازنی اندازه گیری شده و سطح آب درون مخزن متضایر بدست آمد. برای دقیق بیشتر، همان روش را سه مرتبه دیگر تکرار کرده و مقادیر متوسط این داده ها بدست آمدند. در نهایت نمودار  $C_m$  و  $h$  رسم می شود.

جدول ۸: نتایج تست خازن کابل کواکسیال PVC

Actual Height (cm)	C_1 (pF)	C_2 (pF)	C_3 (pF)	C_avg (pF)	Theoretical (pF)	Error %
0	125.2	128.1	128.3	127.2		
0-10	138.6	141.2	141.6	140.4666667	140.8674	0.284475566
11	148.3	149.7	147.6	148.5333333	148.187151	0.233611572
12	156.7	154.3	155.2	155.4	155.506902	0.068744216
13	161.9	159.7	164.5	162.0333333	162.826653	0.487217327
14	163.4	168.6	171.8	167.9333333	170.146404	1.300686124
15	169.3	175.6	178.9	174.6	177.466155	1.615043161
16	174.7	184.3	185.2	181.4	184.785906	1.832339962
17	182.6	191.8	194.3	189.5666667	192.105657	1.321663491
18	197.3	201.3	199.1	199.2333333	199.425408	0.09631404
19	206.3	207.4	206.3	206.6666667	206.745159	0.037965742
20	218.6	214.7	215.1	216.1333333	214.06491	0.966259876
21	226.9	222.6	223.4	224.3	221.384661	1.316865851
22	231.5	231.3	232.6	231.8	228.704412	1.353532262
23	239.6	239.6	240.1	239.7666667	236.024163	1.585644291
24	247.1	245.9	246.3	246.4333333	243.343914	1.26956918
25	254.3	252.8	253.1	253.4	250.663665	1.091636077
26	260.4	259.7	259.9	260	257.983416	0.781671951
27	267.8	266.9	268.5	267.7333333	265.303167	0.915995976
28	274.3	273.8	275.4	274.5	272.622918	0.688526854
29	280.4	283.4	284.1	282.6333333	279.942669	0.961148346
30	288.2	290.1	290.9	289.7333333	287.26242	0.860158921
31	295.9	297.3	296.7	296.6333333	294.582171	0.696295477
32	303.6	304.3	304.1	304	301.901922	0.694953509
33	310.1	310.4	310.9	310.4666667	309.221673	0.402621736
34	317.5	317.9	318.2	317.8666667	316.541424	0.418663267
35	324.9	325.3	325.2	325.1333333	323.861175	0.392809769
36	331.9	332.7	332.9	332.5	331.180926	0.398294073
37	340.6	341.5	340.3	340.8	338.500677	0.679266884

## نتایج

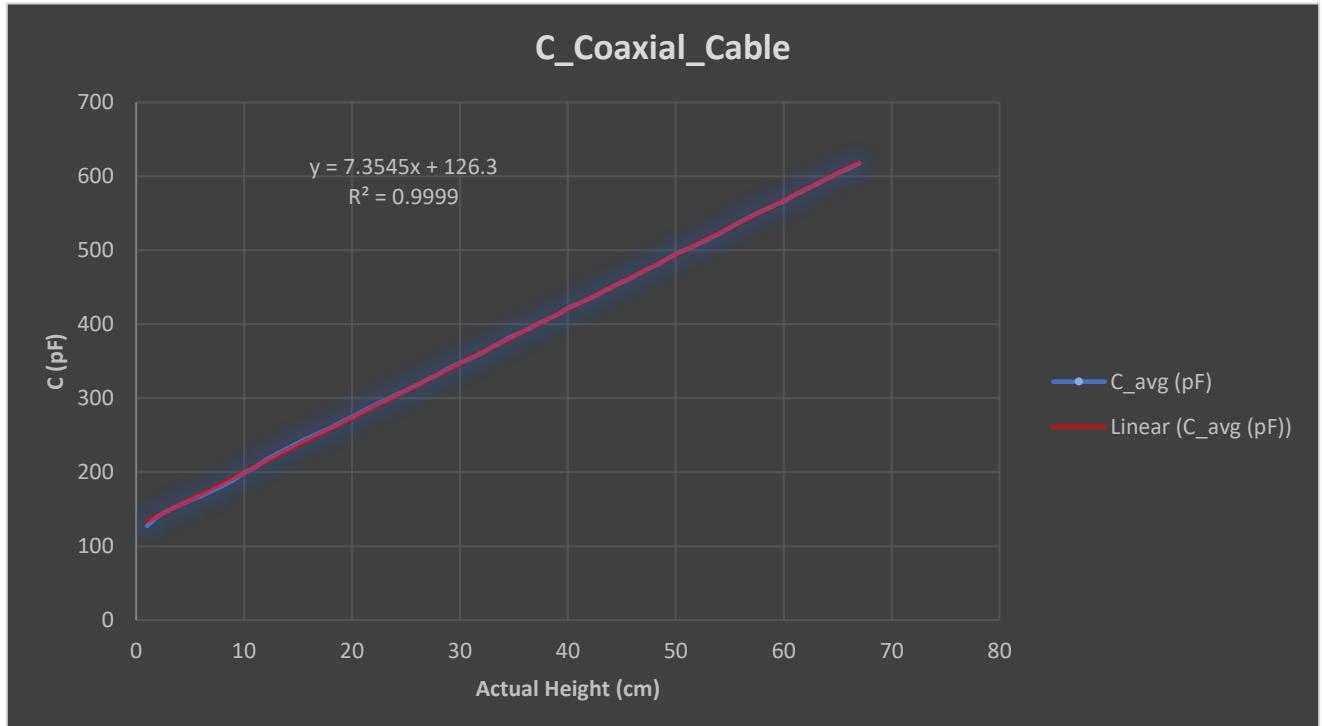
---

38	347.3	348.1	347.4	347.6	345.820428	0.514594239
39	353.2	354.9	354.1	354.0666667	353.140179	0.262356911
40	361.8	361.3	360.9	361.3333333	360.45993	0.242302475
41	369.1	369.5	368.7	369.1	367.779681	0.358997266
42	376.9	377.4	377.3	377.2	375.099432	0.560002981
43	384.6	385.1	384.9	384.8666667	382.419183	0.640000234
44	390.2	391.5	390.9	390.8666667	389.738934	0.289355917
45	398.3	399.5	399.1	398.9666667	397.058685	0.480528884
46	405.3	406.9	406.1	406.1	404.378436	0.425730911
47	412.6	413.2	412.9	412.9	411.698187	0.291916029
48	421.9	422.7	420.9	421.8333333	419.017938	0.671903295
49	427.8	428.5	428.9	428.4	426.337689	0.483727114
50	434.2	434.9	435.4	434.8333333	433.65744	0.271157191
51	441.5	441.3	442.1	441.6333333	440.977191	0.148792805
52	449.2	449.9	450.3	449.8	448.296942	0.335281787
53	456.3	456.9	457.3	456.8333333	455.616693	0.267031554
54	463.9	463.4	464.5	463.9333333	462.936444	0.215340431
55	471.3	471.9	472.6	471.9333333	470.256195	0.356643538
56	478.1	478.6	479.4	478.7	477.575946	0.235366544
57	486.7	486.1	487.1	486.6333333	484.895697	0.358352599
58	495.6	494.5	494.9	495	492.215448	0.565718124
59	502.3	500.9	501.4	501.5333333	499.535199	0.399998706
60	509.3	507.2	507.6	508.0333333	506.85495	0.232489262
61	515.9	514.3	515.1	515.1	514.174701	0.179958096
62	522.7	521.7	522.9	522.4333333	521.494452	0.180036687
63	532.1	529.7	529.9	530.5666667	528.814203	0.331394969
64	540.2	538.7	537.5	538.8	536.133954	0.497272366
65	546.2	545.9	545.6	545.9	543.453705	0.450138619
66	553.2	552.9	553.7	553.2666667	550.773456	0.452674442
67	560.1	559.1	559.9	559.7	558.093207	0.287907643
68	566.9	566.2	565.9	566.3333333	565.412958	0.162779314
69	575.1	574.7	574.2	574.6666667	572.732709	0.337671943
70	582.8	581.9	580.8	581.8333333	580.05246	0.307019357
71	590.1	589.6	588.8	589.5	587.372211	0.362255646
72	597.3	596.1	596.5	596.6333333	594.691962	0.326449903
73	604.2	603.7	603.9	603.9333333	602.011713	0.319199825
74	610.9	610.3	610.5	610.5666667	609.331464	0.202714407
75	618.2	617.8	617.3	617.7666667	616.651215	0.180888587

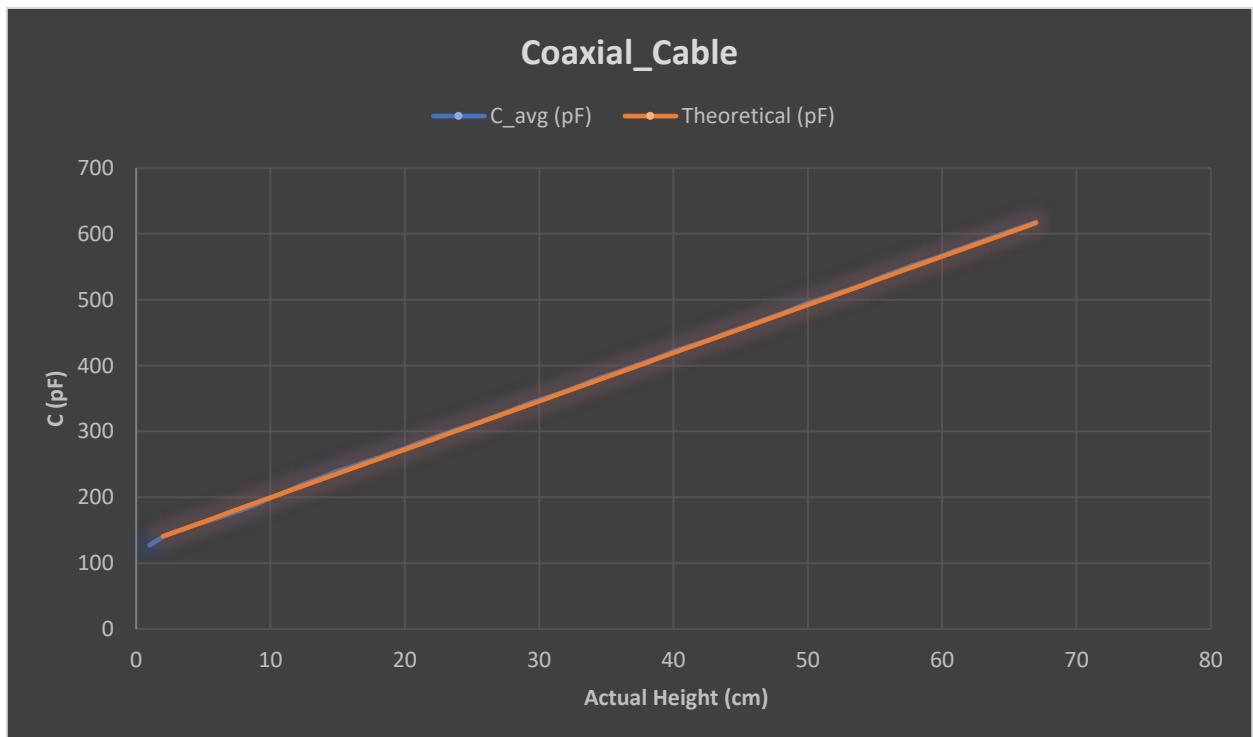
در شکل فوق داده‌های ثبت شده برای تست عملکرد خازنی کابل کواکسیال را مشاهده می‌شود. ۳ مرتبه این آزمایش تکرار شد تا دقیق نتایج بررسی شود بعد از آن برای هر ارتفاع، میانگین ظرفیت‌های ثبت شده محاسبه شده و آن ستون مبنا کار قرار خواهد گرفت. در بخش روابط حاکم بر حسگر سطح‌سنجد طراحی شده، ظرفیت تئوری خازن بررسی شد و مشاهده شد که دو خازن مرجع چه ظرفیتی دارند. در اینجا  $pF$  24 نیز به آن ظرفیت اضافه می‌شود: یکی برای ظرفیت خازنی معادل کانکتور

## نتایج

BNC استفاده شده و یکی برای پرابهای وصل شده به LCR متر. حال نمودار و خط رگرسیون مربوط به این داده رسم می‌شود و سپس به آنالیز آن پرداخته خواهد شد.



شکل ۷۱: نمودار تست عملکردی خازن کابل کواکسیال



شکل ۷۲: مقایسه ظرفیت خازن کابل کواکسیال و مقدار تئوری

در نمودار فوق پلات رسم شده از داده های بدست آمده مشاهده می شود. همانطور که مشخص است خط فیت شده بر داده های بدست آمده از ظرفیت خازنی کابل کواکسیال در ارتفاع های مختلف آب در مخزن، خطی است و مشخصه درستی بدست آمده است. این داده اختلافی کمی با داده تئوری محاسبه شده دارد. همانطور در فصل قبل بررسی شد، معادله تئوری حاکم بر این خازن در معادله ۶ نشان داده شده است و بصورت زیر می باشد:

$$C_m = C_0 + C_\delta = 134.76 + 731.98\delta_h$$

همانطور که در شکل ۷۱ دیده می شود، معادله حاکم بر خط فیت شده بر دیتا بدست آمده از تست عملکردی خازن کواکسیال به صورت زیر می باشد:

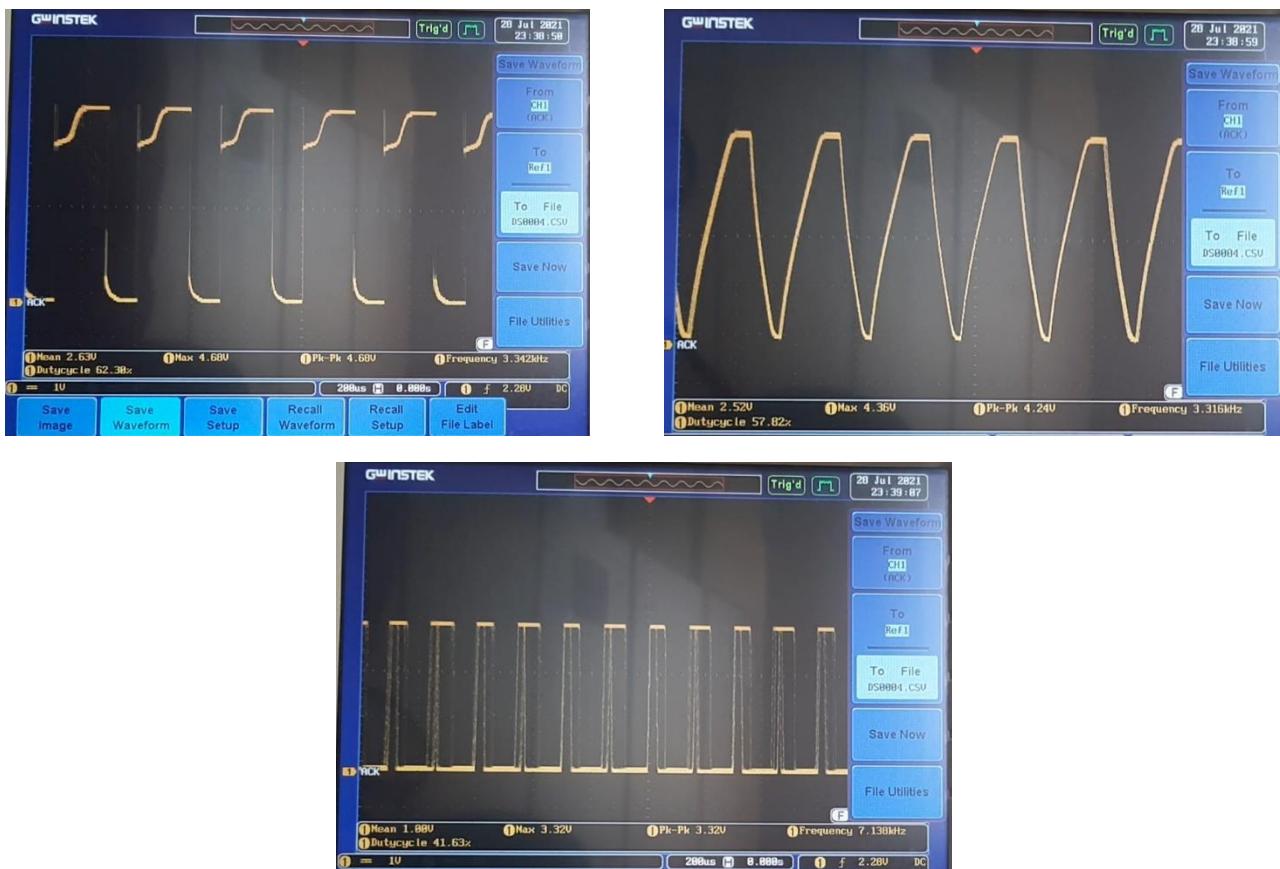
$$y = 7.3545x + 126.3$$

معادله ۱۱: معادله خط فیت شده بر دیتا تست عملکردی خازن کابل کواکسیال

مشخصا در صورت قرار دادن ارتفاع آب مخزن به واحد متر، خط فیت شده کمترین خطا را با معادله تئوری حاکم دارد. همین مهم از دقت و صحبت تست عملکردی خازن کواکسیال حکایت دارد. حال که این تست مهم انجام شد، به سایر نتایج پرداخته خواهد شد.

### ۳-۳- تست عملکرد مدار آنالوگ

در این بخش تست مدار آنالوگ طراحی شده را بررسی خواهد شد. همانطور که در مرحله قبل مشاهده شد، کابل کواکسیال استفاده شده به خوبی در ارتفاع های مختلف، ظرفیت خازن متناظر را به عنوان خروجی می دهد و در LCR متر قابل مشاهده بود. حال از این ظرفیت به عنوان خازن تحریک کننده<sup>۶۸</sup> آی سی ۵۵۵ استفاده می شود. خروجی های آی سی ۵۵۵ و بافر و مقایسه کننده در زیر مشاهده می شود. ابتدا سیگنال های خروجی آنالوگ در حالت خازن بیرون مخزن و بدون تماس با آب بررسی می شود.



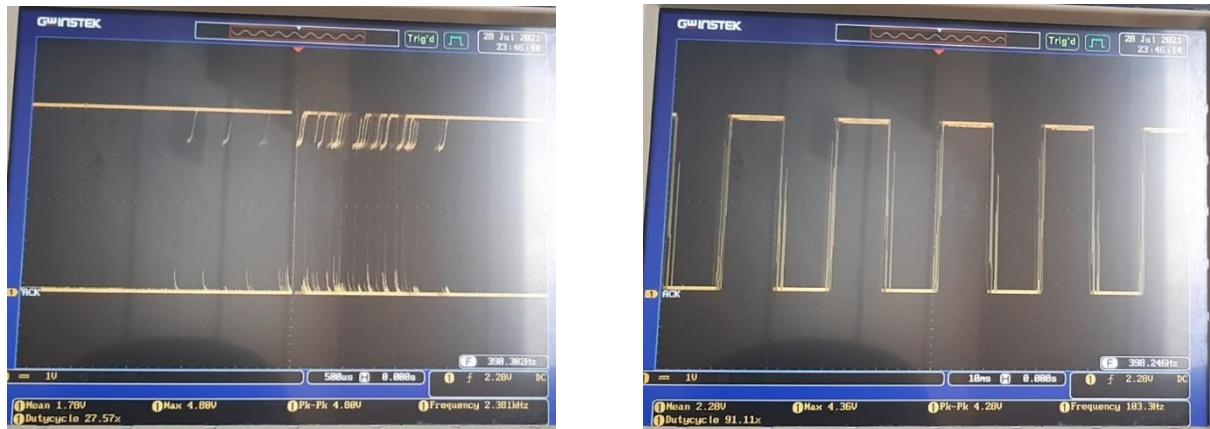
شکل ۷۳: بررسی خروجی سیگنال مدار آنالوگ در حسگر بدون تماس با آب

شکل بالا چپ: خروجی آی سی NE555 – شکل بالا راست: خروجی بافر آی سی LMV358 – شکل پایین: خروجی مدار مقایسه کننده

متاسفانه در این بخش نتیجه مطلوب حاصل نشد. همانطور که در اشکال فوق مشاهده می کنید سیگنال خروجی آنالوگ بشکل مطلوبی تشکیل نشده است. سیگنال خروجی از بافر بدليل داشتن نویزهای بسیار ریز به روی خط موج، سبب شده است که خروجی مقایسه کننده به این شکل تشکیل شود و فرکانس خروجی آن بسیار بالاتر از فرکانس مورد نظر باشد. استفاده از کابل کواکسیال با طول بلند به عنوان خازن، با ولتاژ کاری ۵ ولت و جریان در حد میلی آمپر، سبب می شود فرایند شارژ و دیس شارژ خازن تریگر آی سی اسیلاتور ۵۵۵ به خوبی انجام نپذیرد و شکل موج خروجی به این شکل در بایان نه بصورت یک پالس مربعی شارپ و دقیق.

<sup>68</sup> trigger

اما با همه این تفاسیر، سیگنال خروجی آی‌سی ۵۵۵ در حالتی که بیرون از مخزن قرار دارد، به خوبی خوانده می‌شود. هم از طریق ADC موجود اسیلوسکوپ و هم از طریق میکروکنترلر، فرکانس به خوبی و دقیق و درست خوانده می‌شود. اما مشکل اصلی در حالتی بوجود می‌آید که خازن درون آب قرار می‌گیرد.



شکل ۷۴: خروجی سیگنال آی‌سی ۵۵۵ در حالت خازن درون آب

شکل سمت راست: خروجی در حالت zoom in – شکل سمت چپ: خروجی در حالت zoom out

در شکل ۷۴ خروجی سیگنال اسیلاتور در حالتی که در خازن درون آب قرار گرفته است، مشاهده می‌شود. در نمای کلی، شکل موج بصورت مربعی تشکیل شده است اما دارای اسپایک‌های سوزنی شکل در قبل و بعد مربع تشکیل شده می‌باشد. در نمای زوم شده، این اسپایک‌ها و نویزها با دقت دیده می‌شود. این نویزها بشدت دچار پدیده جیتر<sup>۶۹</sup> هستند و بصورت پایدار و stable قابل ثبت نیستند. همین نویزها و اسپایک‌های سوزنی شکل سبب می‌شود که فرکانس این سیگنال توسط اسیلوسکوپ به غلط تشخیص داده شود و در حالی که باید فرکانس پالس در این حالت حدود ۳ کیلوهرتز تشخیص داده شود، این فرکانس عدد دیگری خوانده می‌شود. این جیتر و اسپایک‌های سوزنی سبب می‌شود سیگنال مطلوب حاصل نشود و نتوان دلیلی مناسب برای این امر پیدا کرد. در حقیقت با توجه به پیکربندی انجام شده طبیعتاً نباید در تماس با آب چنین مشکلی بوجود آید اما در عمل چنین می‌شود که پیدا کردن دلیل این پدیده نیازمند وقت و سعی و خطا بسیار می‌باشد. در حقیقت باید تمام پارامترهای دخیل در این مدار بطور دقیق بررسی شود و علت این پدیده به طور دقیق موشکافی شود.

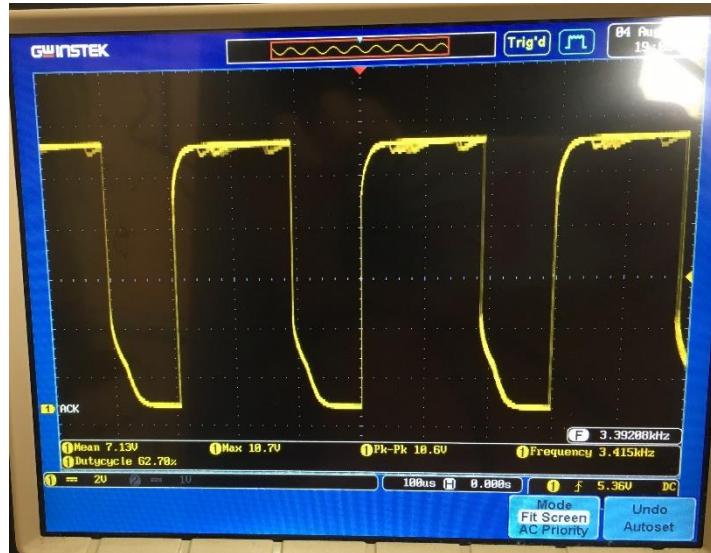


شکل ۷۵: خروجی مقایسه‌کننده در حالت خازن درون آب

<sup>69</sup> Jitter

## نتایج

برای حل این مشکل راهها مختلفی بررسی شد، اما به نتیجه مطلوب منجر نشد. تنها راهی که کمی شکل موج خروجی را مورد بهبود قرار داد و خطای حاصل را کاهش داد، استفاده از ولتاژ کاری بالا در مدار آنالوگ بود. با بررسی دقیق‌تر دیتاشیت آی‌سی NE555 به این نتیجه رسیده شد که راهاندازی مدار در ولتاژ کاری ۱۲ و یا ۱۵ ولت منجر به بهبود عملکرد این مدار آنالوگ می‌شود. نتایج خروجی حاصل از این در زیر مشاهده می‌شود.



شکل ۷۶: تست عملکرد مدار آنالوگ با ولتاژ کاری ۱۲V



شکل ۷۷: تست عملکرد مدار آنالوگ با ولتاژ کاری ۱۲V در آب

مشخصا با استفاده از ولتاژ کاری ۱۲ ولت، جیتر خروجی کمتر شده است و سیگنال خروجی آی‌سی ۵۵۵، دقیق‌تر شده است. اما همچنان خروجی مدار آنالوگ، مطلوب نیست و نوسان دارد و فرکانس خروجی قابل تشخیص نیست.

در این قسمت متأسفانه نتایج مطلوب حاصل نشد. در حقیقت بدلیل خروجی نامطلوب اسیلاتورها فرکانس پالس به درستی تشخیص داده نمی شد. نه تنها فرکانس غلط بود بلکه اصولاً بدلیل وجود پدیده جیتر در این پالس ها فرکانس ثابت و stable قابل خواندن نبود که بشود ثبت و ضبط شود.

به هر حال با توجه به تست این مدار قبل چاپ PCB، بر روی برد بورد و مثبت بودن تست این مدار، به نظر می آید دو فرضیه زیر دلایل بوجود آمدن چنین خروجی نامطلوبی در تست نهایی حسگر باشد:

- ساختار اتصال کابل کواکسیال به وزنه استیل، نایمن طراحی و یا اجرا شده است. عدم اتصال ایمن و نفوذ قطرات آب به داخل وزنه و برقراری اتصال بین دو صفحه خازن، سبب می شود خازن مناسبی برای تحریک آی سی ۵۵۵ تشكیل نشود. البته این فرضیه تا حد زیادی رد است زیرا دیتا بدست آمده از تست عملکردی خازن کواکسیال بسیار مطلوب و نزدیک به تئوری حاکم بود
- اصولاً این مدار و استفاده از یک خازن متغیر (آن هم به شکل کابلی) بعنوان تریگر آی سی NE555 عملکرد نامطلوبی دارد و شاید استفاده از پل ها و سایر انواع مدار برای تشخیص ظرفیت خازنی کابل کواکسیال، اثر بهتری داشته باشد.

از آنجا که انتخاب این روش برای پیاده سازی این حسگر پس از بررسی و مطالعه و شبیه سازی فراوان انجام گرفت اما نتیجه مطلوبی در تست نهایی به همراه نداشت، پیدا کردن دلیل اصلی این مشکل و حل آن نیازمند سعی و خطا و کار تجربی بسیاری است. تا با تست و پیاده سازی ساختارها و مدارهای مختلف به خروجی مطلوب که همان پالس مربعی شارب و دقیق با فرکانس متغیر ایمن باشد، به این مهم دست یافت.

### ۴-۳ - تست عملکرد کلی حسگر

در این بخش عملکرد حسگر خازنی بصورت کلی بررسی خواهد شد. در حقیقت بدليل سیگنال نامطلوبی که در بخش تست عملکرد مدار آنالوگ بررسی شد، پالس صحیحی وارد میکروکنترلر نمی شود و میکروکنترلر نیز فرکانس های بسیار نامطلوب تشخیص می دهد. در حقیقت بدليل وجود پدیده جیتر در سیگنال مدار آنالوگ، میکروکنترلر نیز فرکانس های stable و باثباتی نمی خواند که بخواهد فرکانس متناظر ارتفاع آب مخزن را تشخیص دهد. در واقع میکرو، عملکرد خود را درست انجام میدهد اما سیگنال ورودی همراه جیتر است ولی فرکانس خوانده شده دارای نوسان<sup>۷۰</sup> بسیاری است.

```
data: 433 ----avg_frequency is: 2758 Hz -----capacitor is: 1301.421997 pF -----height is: 32 cm
data: 434 ----avg_frequency is: 3119 Hz -----capacitor is: 1150.792480 pF -----height is: 12 cm
data: 435 ----avg_frequency is: 3128 Hz -----capacitor is: 1147.481323 pF -----height is: 11 cm
data: 436 ----avg_frequency is: 2691 Hz -----capacitor is: 1333.824463 pF -----height is: 37 cm
data: 437 ----avg_frequency is: 2895 Hz -----capacitor is: 1239.834839 pF -----height is: 24 cm
data: 438 ----avg_frequency is: 2783 Hz -----capacitor is: 1289.731201 pF -----height is: 31 cm
data: 439 ----avg_frequency is: 2842 Hz -----capacitor is: 1262.956299 pF -----height is: 27 cm
data: 440 ----avg_frequency is: 2309 Hz -----capacitor is: 1554.491943 pF -----height is: 67 cm
data: 441 ----avg_frequency is: 2502 Hz -----capacitor is: 1434.581055 pF -----height is: 51 cm
data: 442 ----avg_frequency is: 2845 Hz -----capacitor is: 1261.624512 pF -----height is: 27 cm
data: 443 ----avg_frequency is: 2755 Hz -----capacitor is: 1302.839111 pF -----height is: 33 cm
data: 444 ----avg_frequency is: 2817 Hz -----capacitor is: 1274.164673 pF -----height is: 29 cm
data: 445 ----avg_frequency is: 2820 Hz -----capacitor is: 1272.809082 pF -----height is: 28 cm
data: 446 ----avg_frequency is: 2753 Hz -----capacitor is: 1303.785645 pF -----height is: 33 cm
data: 447 ----avg_frequency is: 2758 Hz -----capacitor is: 1301.421997 pF -----height is: 32 cm
data: 448 ----avg_frequency is: 2836 Hz -----capacitor is: 1265.628296 pF -----height is: 27 cm
data: 449 ----avg_frequency is: 2674 Hz -----capacitor is: 1342.304321 pF -----height is: 38 cm
data: 450 ----avg_frequency is: 2707 Hz -----capacitor is: 1325.940796 pF -----height is: 36 cm
data: 451 ----avg_frequency is: 2829 Hz -----capacitor is: 1268.759988 pF -----height is: 28 cm
data: 452 ----avg_frequency is: 2891 Hz -----capacitor is: 1241.550293 pF -----height is: 24 cm
data: 453 ----avg_frequency is: 2872 Hz -----capacitor is: 1249.763794 pF -----height is: 25 cm
data: 454 ----avg_frequency is: 2830 Hz -----capacitor is: 1268.311523 pF -----height is: 28 cm
data: 455 ----avg_frequency is: 2741 Hz -----capacitor is: 1309.493530 pF -----height is: 33 cm
data: 456 ----avg_frequency is: 2723 Hz -----capacitor is: 1318.149780 pF -----height is: 35 cm
data: 457 ----avg_frequency is: 3088 Hz -----capacitor is: 1162.345093 pF -----height is: 13 cm
data: 458 ----avg_frequency is: 2975 Hz -----capacitor is: 1206.494751 pF -----height is: 19 cm
data: 459 ----avg_frequency is: 2785 Hz -----capacitor is: 1288.804932 pF -----height is: 31 cm
```

شکل ۷۸: دیتا خروجی میکروکنترلر

تست بالا در حال بررسی عملکرد حسگر در مخزن در حال پر شدن، ثبت شده است. در حالیکه در مخزن ۳۰ سانتی متر آب قرار داشت، این خروجی برای میکروکنترلر از طریق ارتباط سریال با کامپیوتر ثبت شده است. هر ۵۰۰ دیتا ثبت شده در میکرو میانگین گرفته می شود و سپس به عنوان خروجی ثبت می شود به این توصیفات حد فاصله هر ثبت دیتا تقریباً ۲ ثانیه است. در شکل فوق fluctuation در سیگنال ورودی به میکرو به وضوح قابل تشخیص است. در حالی که باید خروجی میکرو حول ۳۰ سانتی متر قرار داشته باشد (که آن خطأ با کالیبراسیون حسگر از بین می رود) اما اعداد خروجی در یک رنج گسترده در حال نوسان است. در حقیقت میکروکنترلر و کد نوشته برای این قسمت بدرستی در حال انجام وظایف خود می باشند اما سیگنال ورودی به میکروکنترلر بشدت دارای نویز و نوسان است لذا خروجی میکروکنترلر نیز دارای نوسانات بسیار زیادی است.

<sup>70</sup> fluctuation

### ۳-۵- آنالیز نتایج

بطور کلی برای یک سنسور باید یک کاتالوگ مناسب نیز طراحی کرد. همان‌طور که در بخش ۱-۴-پیشینه پژوهش بررسی شد، شرکت‌های سازنده تجهیزات ابزار دقیق برای هر کدام از محصولاتشان یک کاتالوگ بسیار کامل برای توضیح مشخصات و ویژگی‌های تجهیزشان تهیه کرده‌اند. در این پژوهه نیز باید برای سنسور طراحی و ساخته شده کاتالوگی کامل تهیه شود. اما متناسبانه به نتایج دقیقی برای این حسگر حاصل نشد.

آنالیز نتایج بر اساس دیتا بدست آمده در بخش ۲-۳-تست عملکرد کابل کواکسیال، انجام خواهد شد. از جمله پارامترهایی که در لازم است آن‌ها آنالیز شود:

- Non Linearity – غیرخطی‌گری
- Resolution – تفکیک‌پذیری
- Repeatability – تکرارپذیری
- Hysteresis – پسماند
- Sensitivity – حساسیت

در بخش‌های آینده این آنالیز انجام خواهد شد، سپس به بررسی کالیبراسیون این حسگر خواهیم پرداخت.

### ۳-۵-۱- غیر خطی گری

با استفاده از دیتا بدست آمده در بخش تست عملکرد کابل کواکسیال، نمودار غیرخطی گری خازن رسم می‌شود.



شکل ۷۹: نمودار غیرخطی گری حسگر

دیتا بدست آمده مشخص است که در ابتدای پر کردن مخزن، خطای غیرخطی گری سیستم بسیار نوسان دارد که این امر بخاطر عدم شناور بودن کامل حسگر در سطح آب در سطح کمتر از ۱۰ سانتی متر است.

مشخصاً بیشترین خطای غیر خطی گری در سیستم برابر  $0.7840\%$  باشد که چنین درصدی در حدود  $0.8\%$  بسیار مطلوب می‌باشد.

### ۴-۵-۳- تفکیک پذیری

بر اساس معادله ۶: رنج ظرفیت خازن تشکیل شده، رزولوشن این خازن بدست می‌آید. البته برای بدست آوردن رزولوشن بر اساس داده تجربی از معادله ۱۱، استفاده می‌شود.

$$y = 7.3545x + 126.3$$

این معادله بصورت زیر تغییر داده می‌شود:

$$C = 7.3545h + 126.3$$

مشخصاً تغییرات خازن برابر می‌شود:

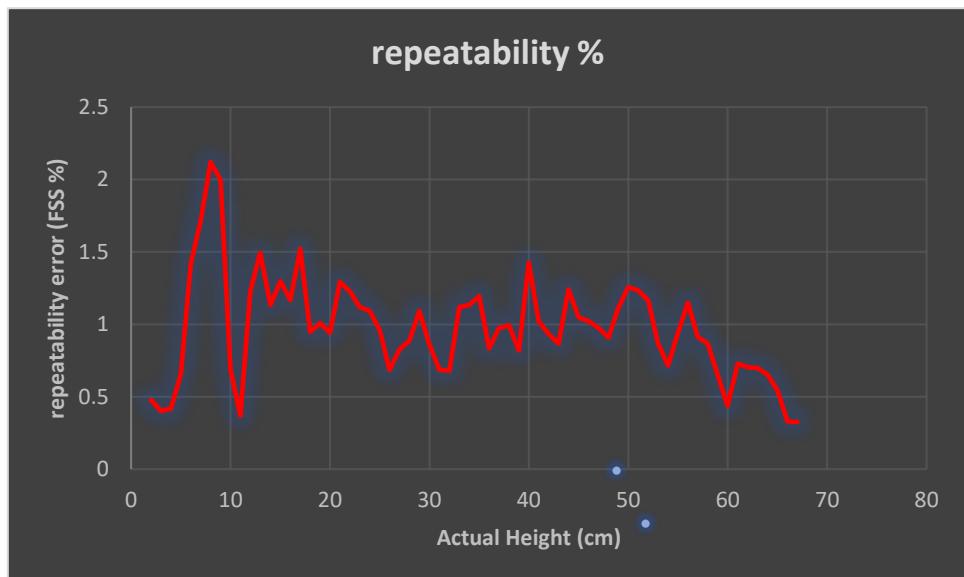
$$\Delta C = 7.3545\Delta h$$

$$\text{معادله ۱۲: معادله رزولوشن حسگر}$$

مشخصاً به ازای هر ۰.۱ پیکوفاراد تغییر قابل تشخیص در LCR متر، ۰.۱۴ میلی‌متر تغییر در ارتفاع بدست می‌آید. بر همین اساس رزولوشن این حسگر برابر با ۰.۱۴ mm محاسبه می‌شود.

### ۳-۵-۳- تکرارپذیری

در آزمایش، تکرارپذیری سنسور نیز مورد آزمایش قرار گرفت. در سطح مایع ثابت، تعداد زیادی از اندازه‌گیری‌ها به طور مکرر انجام می‌شود، و مشاهده شد که تفاوت کمی در نتیجه اندازه‌گیری وجود دارد. خطای تکرارپذیری عمدتاً ناشی از سایش قطعات مکانیکی، رانش مدارهای کمکی و تغییر پارامترهای خارجی است.



شکل ۸۰: نمودار خطای تکرارپذیری در تست عملکردی خازن کواکسیال

در شکل فوق درصد خطای تکرارپذیری مشخص است. بر این اساس بالاترین درصد خطا برابر  $2.11\%$  می‌باشد. البته همانند حالت قبل این مقدار در قبل از سطح  $10$  سانتی‌متر رخ داده است. که بخاطر شرایط حسگر ماقبل سطح  $10$  سانتی‌متر قابل توجیه است.

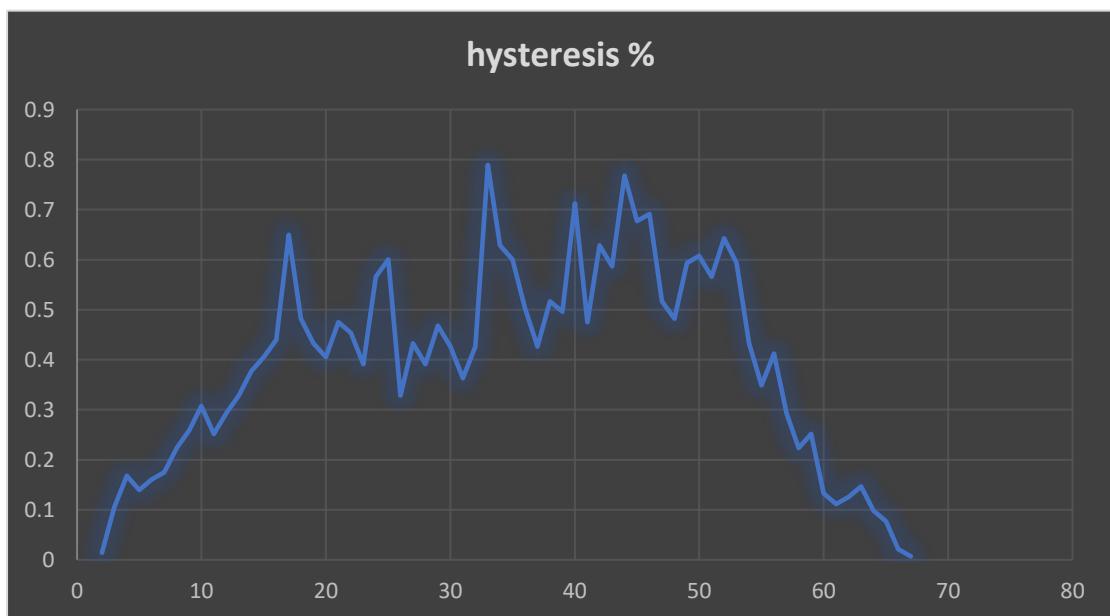
#### ۴-۵-۳- پسماند

سطح مایع به ترتیب در حالت افزایش و سپس در حالت کاهش اندازه‌گیری شد تا اثر پسماند سنسور پیشنهادی ما ارزیابی شود. فرایند آزمایش در کل سه بار تکرار شد. مقدار متوسط هر نقطه آزمایش شده در دو حالت مختلف محاسبه شده و آنها در شکل زیر رسم شده‌است. مشاهده می‌شود که تفاوت کمی در همان سطح وجود دارد. هنگامی که در حالت کاهش، مقادیر مایع اندازه‌گیری شده کمی بیشتر از مقادیر در حالت افزایش است.



شکل ۸۱: نمودار هیسترزیس تست عملکرد خازن کواکسیال

در نمودار فوق مشخصاً تفاوت آنچنانی در مشهود نیست. بهمین علت نمودار درصد خطای هیسترزیس رسم شده است.



شکل ۸۲: نمودار درصد خطای هیسترزیس تست عملکرد خازن کواکسیال

مشخصا درصد خطای هیسترزیس این حسگر در سطح ۳۳ سانتی‌متری بوجود می‌آید و برابر ۰.۷۹ % می‌باشد. مشخصا در رنج اندازه‌گیری این تست چنین درصدی از دقت قابل قبولی برخوردار است.

البته لازم به ذکر است بدلیل محدودیت‌های موجود در مخزن مورد آزمایش، اثرات افت هد پرکردن مخزن و تخلیه مخزن بروی سطح آب قرائت شده از روی مخزن اثر گذاشته و ممکن است درصدی خطا هیسترزیس ناشی از این محدودیت بوده باشد.

### ۳-۵-۵- آنالیز حساسیت

حساسیت این حسگر در واقع به نسبت تغییر پارامتر اندازه‌گیری شده به پارامتر ورودی تغییر یافته گفته می‌شود. در این نمونه بخصوص حساسیت حسگر برابر معادله زیر می‌باشد:

$$\frac{\partial C}{\partial h}$$

معادله ۱۳: معادله حساسیت حسگر خازنی طراحی شده

همانطور که در بخش ۲-۳- تست عملکرد کابل کواکسیال بررسی گردید، دیتاهای بدست آمده با دستگاه LCR متر بطور دقیق ثبت شده است. براساس همان خط رگرسیون فیت شده بر نمودار داده‌ها در خط فیت شده برابر با :

$$y = 7.3545x + 126.3$$

می‌باشد. بر همین اساس حساسیت این حسگر برابر با  $(\frac{pF}{cm})$  ۷.۳۵۴۵ تعیین می‌گردد.

همانطور که براساس تئوری انتظار داشتیم، ظرفیت خازن کابل کواکسیال بصورت خطی با افزایش ارتفاع سطح آب درون مخزن افزایش پیدا می‌کند.

### ۶-۵-۳- کالیبراسیون

فرایند کالیبراسیون حسگر با استفاده از روش حداقل مربعات انجام پذیر است. در این روش یک مدل چندجمله‌ای را برای حسگر اتخاذ می‌شود سپس دیتاها را ثبت شده از خازن کواکسیال بصورت زوج مرتب  $(u, y)$  قرار داده می‌شود.  $u$  خروجی ثبت شده از LCR متر و  $y$  سطح واقعی آب درون مخزن است که از روی مخزن مدرج خوانده شده است. برای این حسگر با توجه به پارامترهای دخیل در حسگر یک چند جمله درنظر گرفته می‌شود.

$$y = a_4 e^C + a_3 \ln C + a_2 C^2 + a_1 C^1 + a_0 C^0$$

معادله ۱۴: مدل اتخاذ شده برای کالیبراسیون

پس از استفاده از روش حداقل مربعات و تشکیل ماتریس‌های مربوطه، ضرایب جملات این چندجمله‌ای بدست می‌آید.

دلیل اینکه این چندجمله‌ای دارای ترم‌های  $\ln$  و یا  $e$  می‌باشد به معادله ۵ مربوط است. وجود چنین ترم‌هایی در آن معادله، بر روی چندجمله‌ای تخمین زده شده، تاثیر گذار است.

پس از بدست آمدن ضرایب این چندجمله‌ای، می‌توان از این پس بعد از بدست آوردن ظرفیت خازن از LCR متر با قرار دادن در این چندجمله‌ای، خروجی به مراتب دقیق‌تر و نزدیک‌تر به دیتا تئوری به دست آورد.

## ۶-۳- بحث و نتیجه‌گیری

در این بخش به جمع‌بندی و نتیجه‌گیری نهایی پرداخته می‌شود.

در این پژوهه سعی شد یک حسگر سطح سنج مایعات خازنی ساخته شود. ابتدا تغوری حاکم بر این نوع از حسگرها بررسی شد سپس با شرکت‌های مشهور سازنده این نوع از حسگرها آشنا شده و محصولاتشان بررسی شد. انواع پیکربندی‌های مورد استفاده در ساخت این نوع حسگرها را مورد تجزیه و تحلیل قرار داده شد. سعی بر آن شد مزایا و معایب هر کدام از این پیکربندی‌ها را بررسی کرده تا بهترین نوع پیکربندی بسته محیط و شرایط مورد نظرمان را پیدا کنیم. پیکربندی مورد انتخاب ما استفاده از کابل کواکسیال PVC به عنوان خازن بود. بعد از آنکه پیکربندی مناسب طراحی شد، مکانیزم اندازه‌گیری سطح مایعات به طور دقیق بررسی شد. معادلات حاکم بر این نوع پیکربندی بررسی شد و تئوری این حسگر تکمیل گردید. سپس ساختار مکانیکی حسگر طراحی شد. با بررسی مدل‌های موجود در بازار، ساختار مخصوص پیکربندی طراحی گشت. بعد از ان نوبت به طراحی مدار الکتریکی حسگر رسید. در این بخش با دروس مختلفی از رشتہ مهندسی برق آشنا پیداشد و همچنین نرم‌افزار Altium که مخصوص طراحی بردۀای مدار چاپی است، فراگیری شد. در طراحی مدار الکترونیکی انواع اسیلاتورها و مدارات واپسیه بررسی شد و سعی بر طراحی یک مدار دقیق بر این اساس گماشتۀ شد. سپس میکروکنترلرهای خانواده ARM بررسی شد. مدتی به یادگیری کامل مدل stm32 از این میکروکنترلرها گذشت. همچنین طراحی مدار راهاندازی این میکروها نیز خود بحثی گستره بود که در این مسیر فراگیری شد. بعد از آن سیستم اندازه‌گیری طراحی شده را بصورت آزمایشی شبیه‌سازی شد. مدار آنالوگ بر روی بردبورد پیاده‌سازی شده و با استفاده پیکربندی مورد نظر عملکرد مدار تست شد. بعد از آن اچاپ برد مدار چاپی انجام شد و پیکربندی خازن را با استفاده از کابل کواکسیال RG59 پیاده‌سازی شد. سپس با استفاده از فرمورک Qt برای این حسگر یک نرم‌افزار کامپیوتّری مانیتورینگ طراحی شد. پس از ساخت کامل حسگر، داده‌برداری و ثبت نتایج انجام شد. که مفصل‌بررسی گشت.

حال پس از مروری بر روند انجام پژوهه، بیان نکات و پیشنهاداتی جهت بهبود این پژوهه و پژوهش‌های آینده حول این موضوع بیان می‌شود.

ساخت تجهیزات ابزار دقیق، فرایندی پیچیده و با سطح علمی بالا می‌باشد. لذا به نتیجه‌رسیدن در این پژوهه‌ها نیازمند صرف زمان و هزینه برای فرایند تحقیق و توسعه می‌باشد.

بهتر است تمام انواع پیکربندی‌ها و انواع مدل‌های ساخت چنین تجهیزاتی مورد تست قرار گیرد و بهترین آن مورد انتخاب قرار گیرد.

حوزه ابزار دقیق نیازمند تحلیل آماری بسیاری است، فراگیری دانش مربوط به تحلیل داده‌های آماری بسیار لازم است.

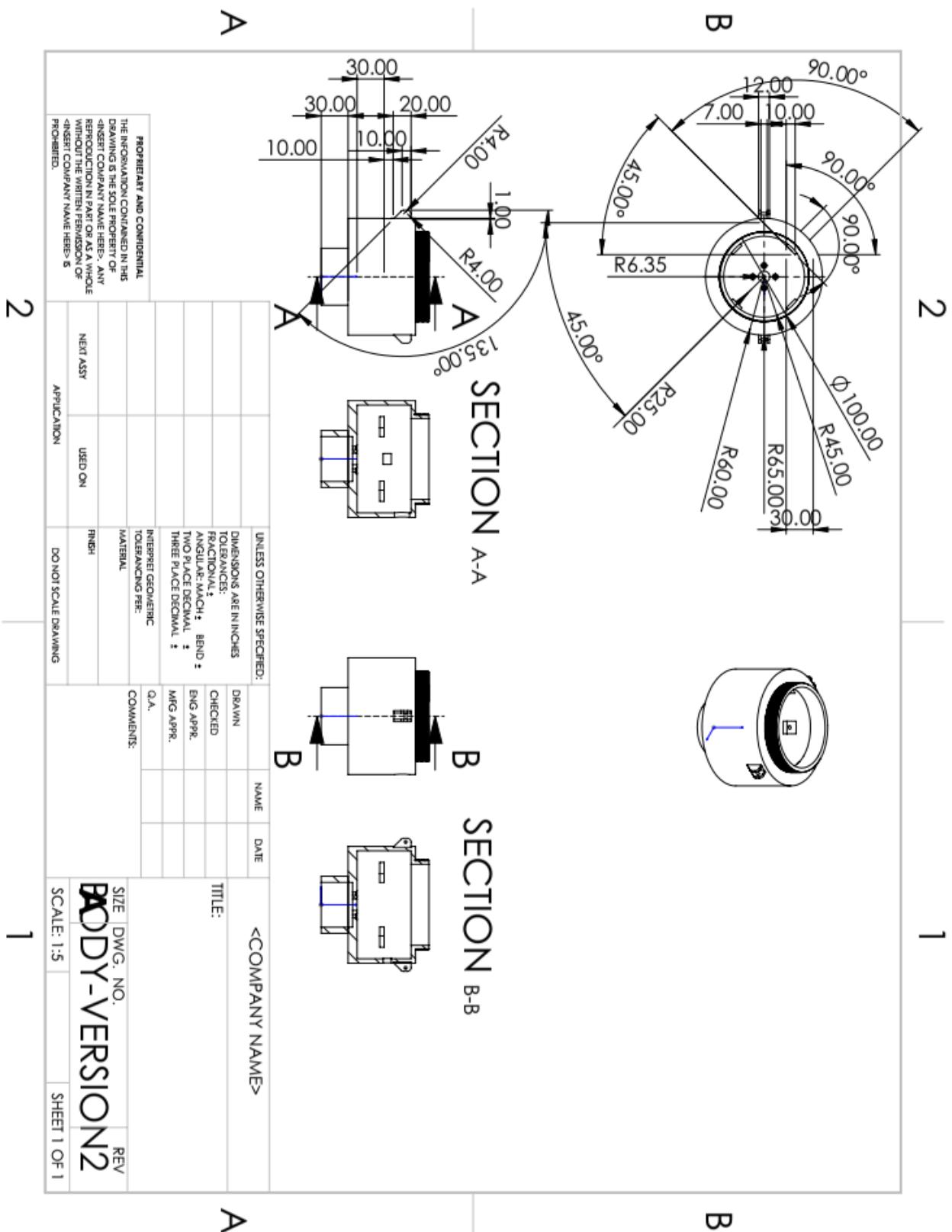
در مجموع ساخت چنین تجهیزاتی نیازمند صبر و حوصله و سعی خطای بسیار است. شاید به همین دلیل است که شرکت‌های محدودی در داخل کشور در این حوزه موفق هستند.



[1]	A. S. Morris, Measurement and Instrumentation Principles, Butterworth Heinemann, 2001.
[۲]	S. Tumanski, Principles of Electrical Measurement, Taylor & Francis, 2006.
[۳]	"www.engineersgarage.com"
[۴]	"en.wikipedia.org/wiki/Level_sensor"
[۵]	B. Jin, X. Liu, Q. Bai, D. Wang , Y. Wang, "Design and Implementation of an Intrinsically Safe Liquid-Level Sensor Using Coaxial Cable ", <i>sensors</i> .۲۰۱۵ ,
[۶]	L. K. Baxter, Capacitive Sensors Design and Applications, New York: Institute of Electrical and Electronics Engineers, Inc, 1997.
[۷]	"endress.com"
[۸]	"VEGA_Grieshaber"
[۹]	"mall.industry.siemens.com"
[۱۰]	A. A. Basfar, "Effect of various combinations of flame-retardant fillers on flammability of radiation ", <i>Polym. Degrad. Stab</i> ,pp. 333-340, 2003.
[۱۱]	A. Q. e. al, "Design of capacitive sensor for water level measurement ", <i>Journal of Physics: Conference Series</i> .۲۰۱۶ ,
[۱۲]	Z. M. V. R. M. Z. V. Milosavljevic, "Implementation of low cost liquid level sensor (LLS) using embedded system with integrated capacitive sensing module ", <i>Mediterranean Conference on Embedded Computing</i> .۲۰۱۲ ,
[۱۳]	R. W. O. S. L. A. D. A. F. F. A. J. C. P. Rodrigo T. Bento, "Design, development and application of a real-time capacitive sensor for automatically measuring liquid level ", <i>Springer Nature Switzerland AG</i> .۲۰۱۹ ,
[۱۴]	"waveforms/555_oscillator"
[۱۵]	"Faradars_L78xx"
[۱۶]	"www.systematick.ir"
[۱۷]	A. Sadighi, "Measurement Systems,Introduction, Part II," University of Tehran, Tehran, 2020.
[۱۸]	E. O. Doebelin, Measurement systems: application and design, McGraw-Hill, 1990.
[۱۹]	S. B .& B. Vasuki, "Performance Enhancement of Capacitance-Type Level Measurement System using CCII-Based Interface ", <i>JETE Technical Review</i> .۲۰۱۹ ,
[۲۰]	K. T. P. K. R. M. R. Stephannie C. Mathews, "Design and Development of a Simple and Efficient Low Cost Embedded Liquid Level Measurement System."
[۲۱]	"www.st.com"
[۲۲]	"deepbluembedded.com"
[۲۳]	"www.tabrizpeguh.com"

پیوست‌ها

# پیوست ۱ نقشه کیس محافظ



1

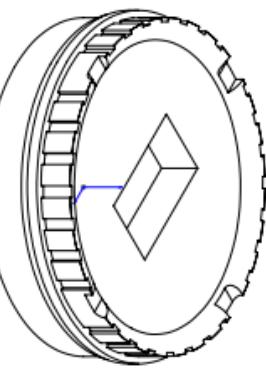
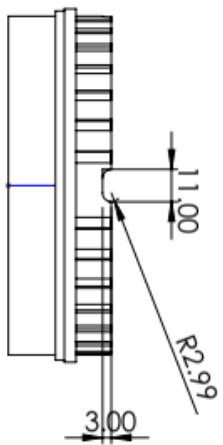
2

**BODYCAP-VERSION2**

REV  
SCALE: 1:2 SHEET 1 OF 1

PROPRIETARY AND CONFIDENTIAL  
THE INFORMATION CONTAINED IN THIS  
DRAWING IS THE SOLE PROPERTY OF  
[REDACTED] COMPANY NAME HEREIN. ANY  
REPRODUCTION IN PART OR AS A WHOLE  
WITHOUT THE WRITTEN PERMISSION OF  
[REDACTED] COMPANY NAME HEREIN IS  
PROHIBITED.

A



B

UNLESS OTHERWISE SPECIFIED:  
DIMENSIONS ARE IN INCHES  
TOLERANCES:  
FRACTIONAL:  
ANGULAR: MACH1: BEND ±  
TWO PLACE DECIMAL ±  
THREE PLACE DECIMAL ±  
INTERFER GEOMETRIC:  
TOLERANCING PER:  
MATERIAL:

COMMENTS:

SIZE DWG. NO.

TITLE:

DRAWN

CHECKED

ENG APPR.

MFG APPR.

O.A.

REV

NEXT ASSY	USED ON	APPLICATION
FRSH		DO NOT SCALE DRAWING

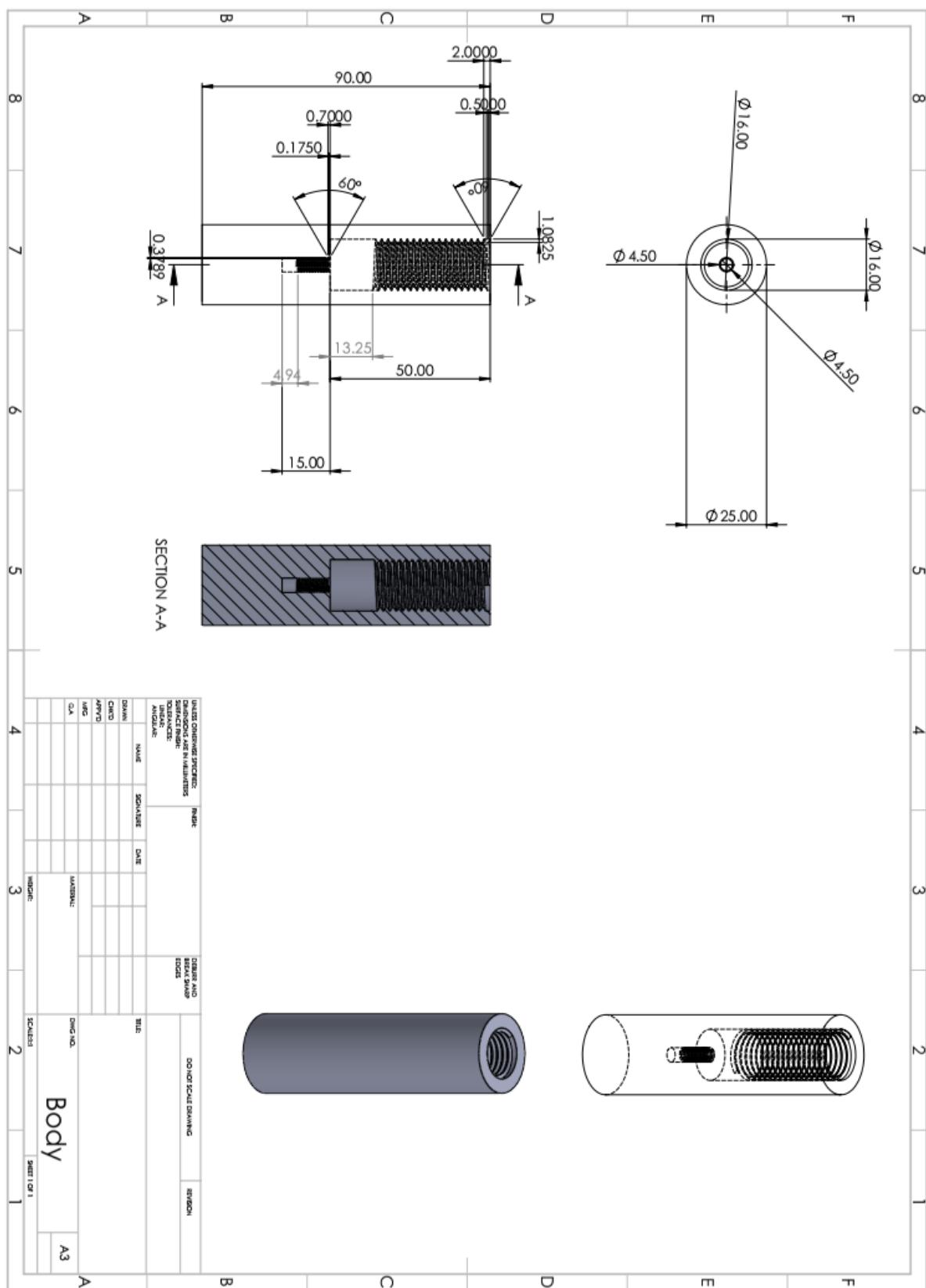
PROPRIETARY AND CONFIDENTIAL  
THE INFORMATION CONTAINED IN THIS  
DRAWING IS THE SOLE PROPERTY OF  
[REDACTED] COMPANY NAME HEREIN. ANY  
REPRODUCTION IN PART OR AS A WHOLE  
WITHOUT THE WRITTEN PERMISSION OF  
[REDACTED] COMPANY NAME HEREIN IS  
PROHIBITED.

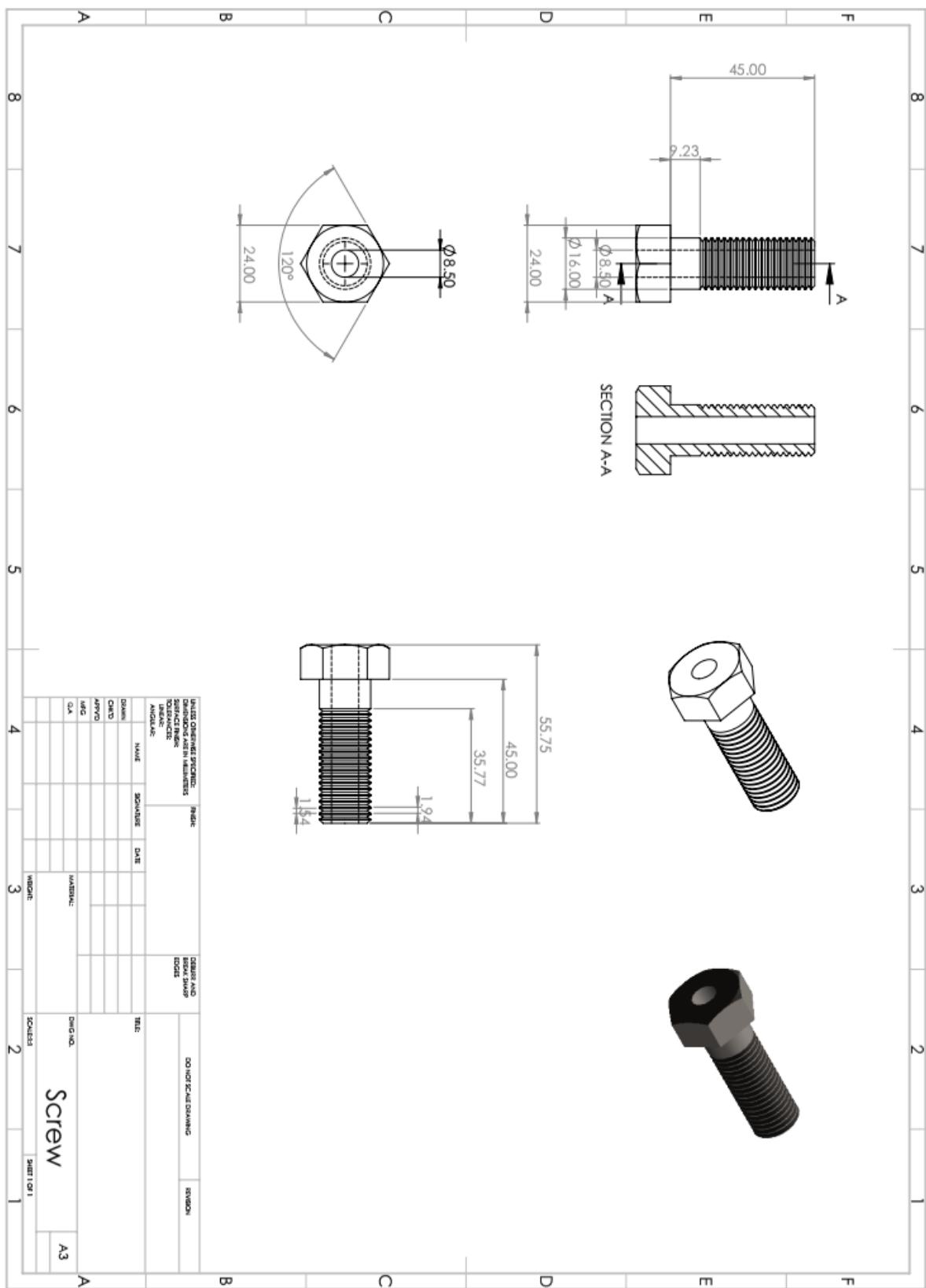
2

1

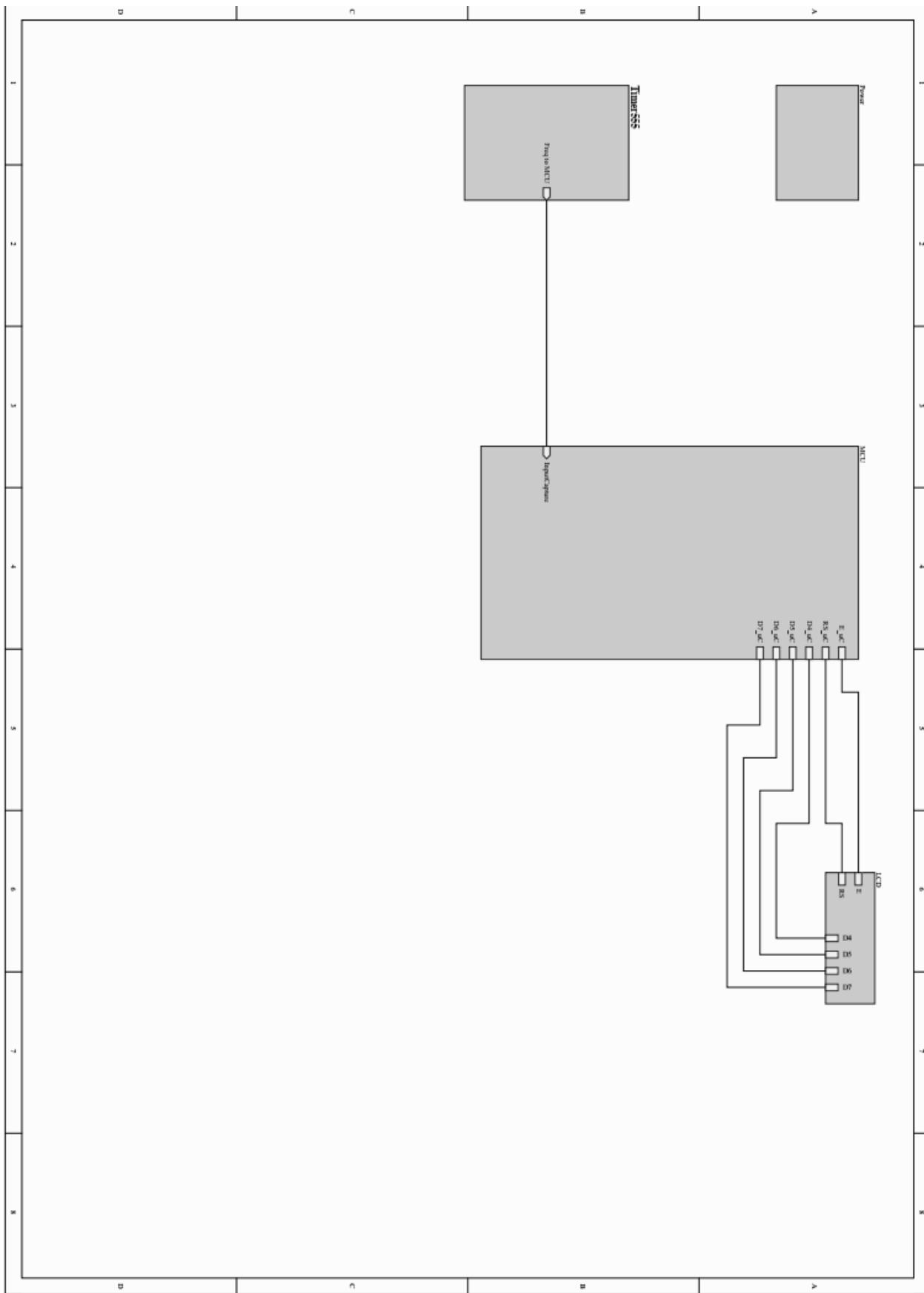
B

## پیوست ۲ نقشه ساختار اتصال کابل کواکسیال به وزنه استیل

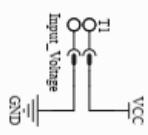




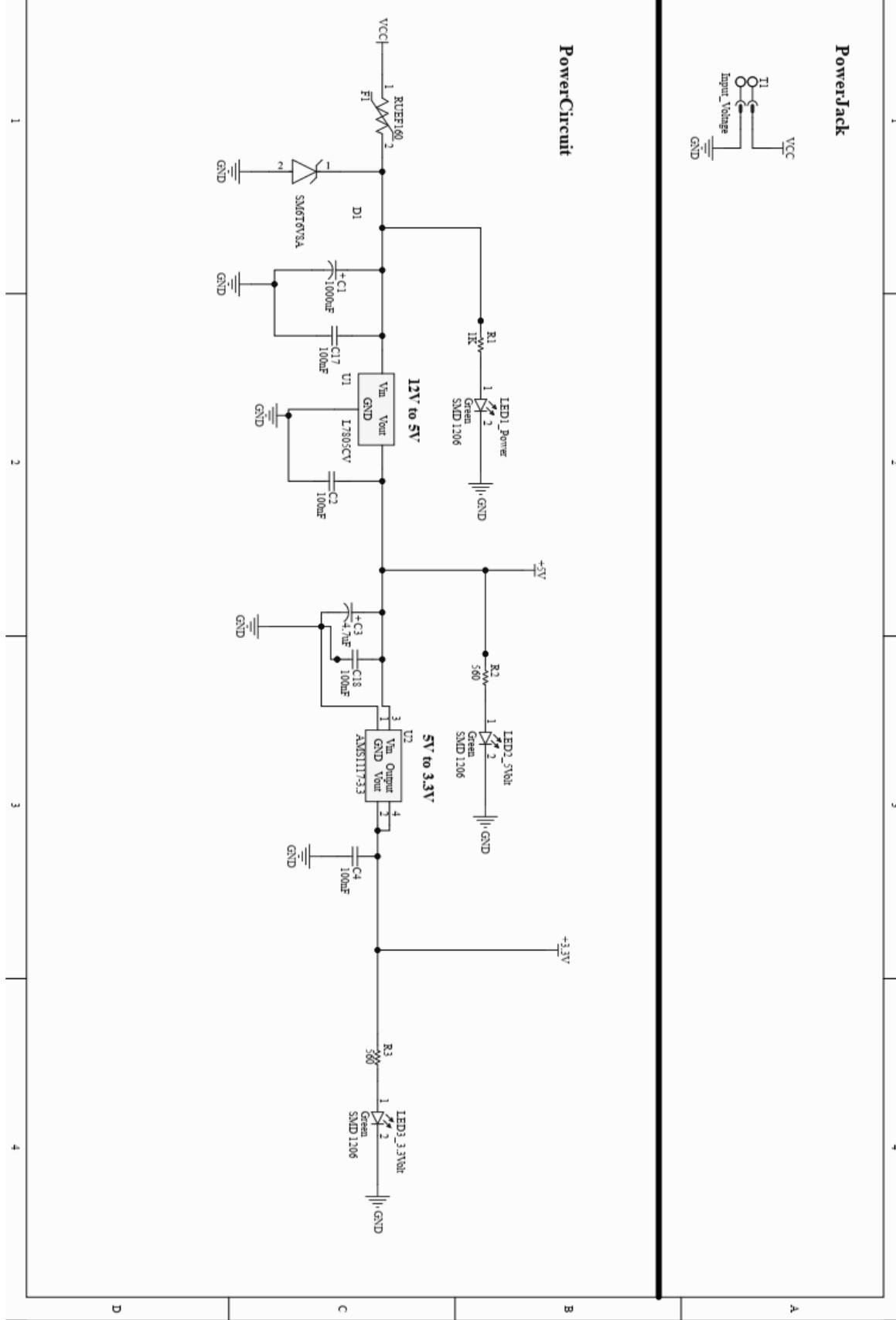
### پیوست ۳ نقشه‌های برد مدار چاپی

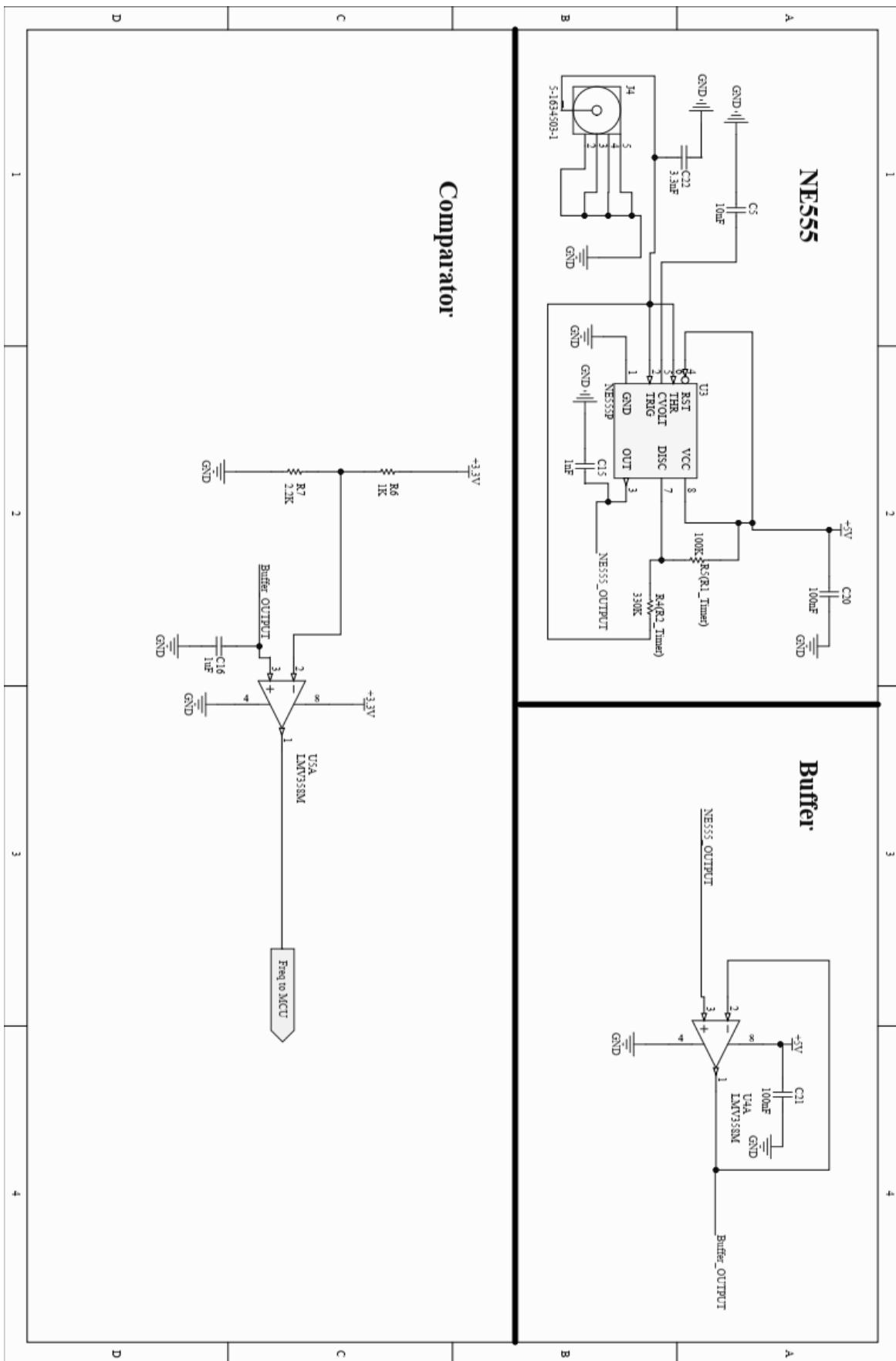


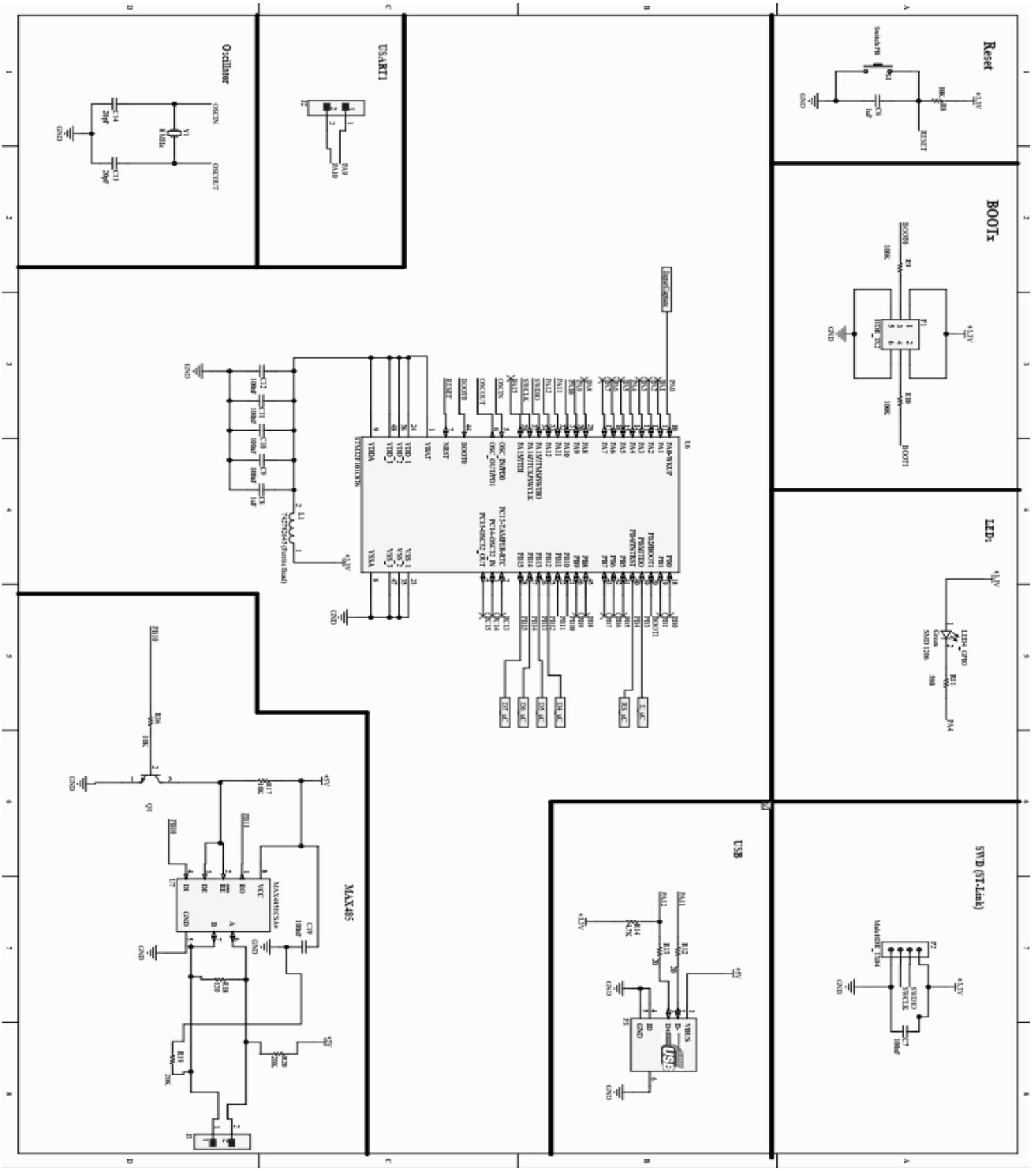
## PowerJack

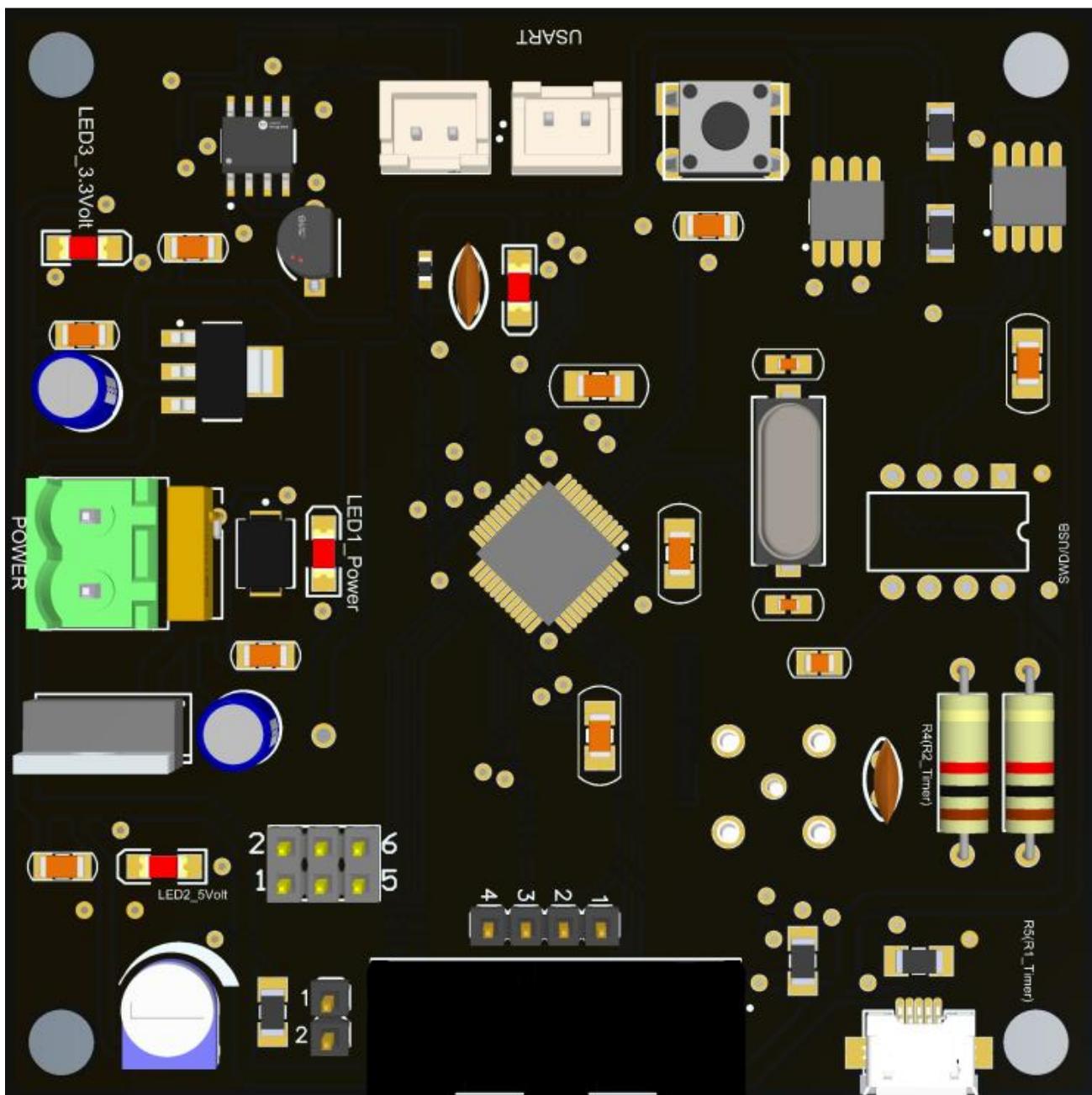


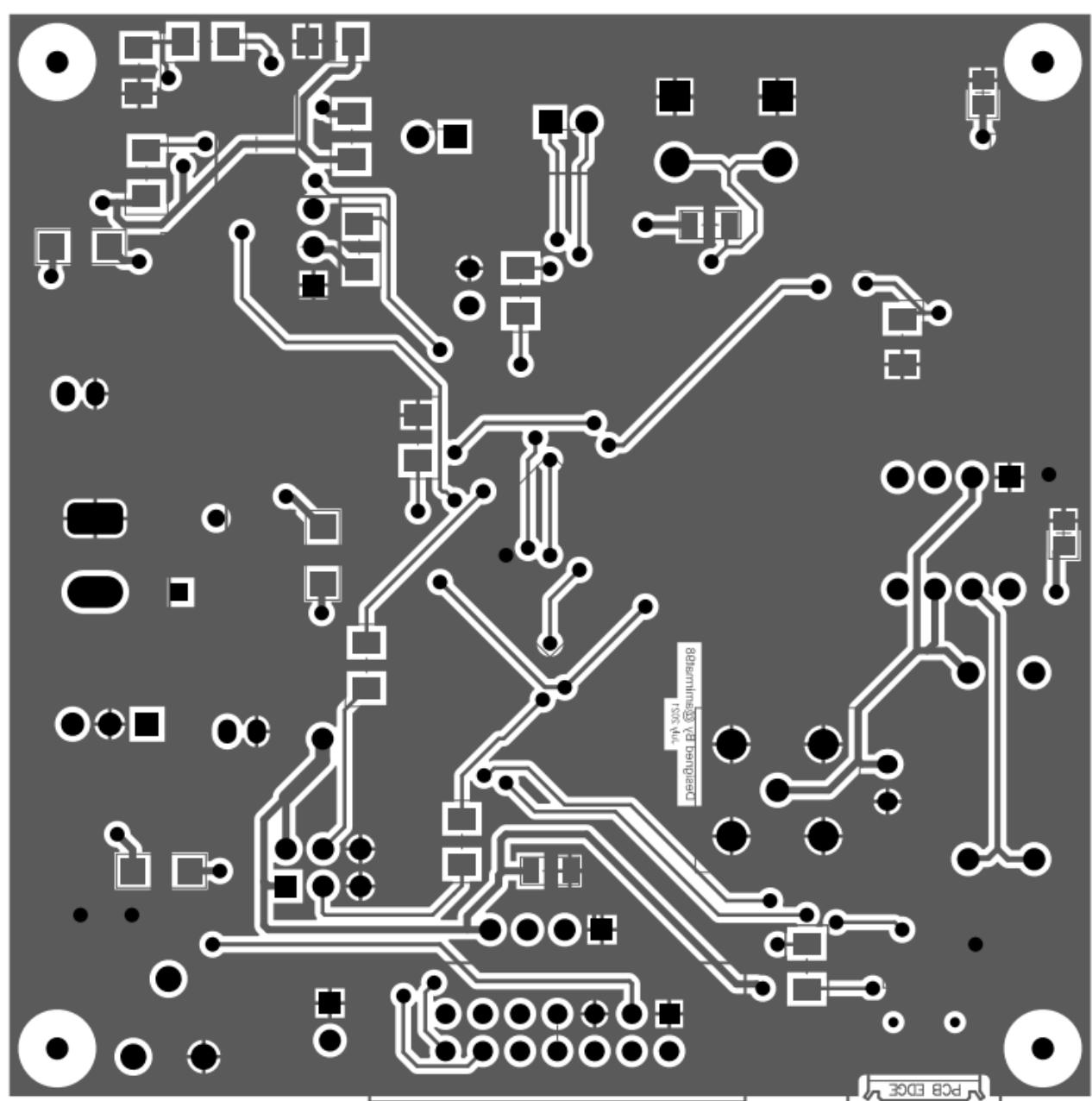
## PowerCircuit

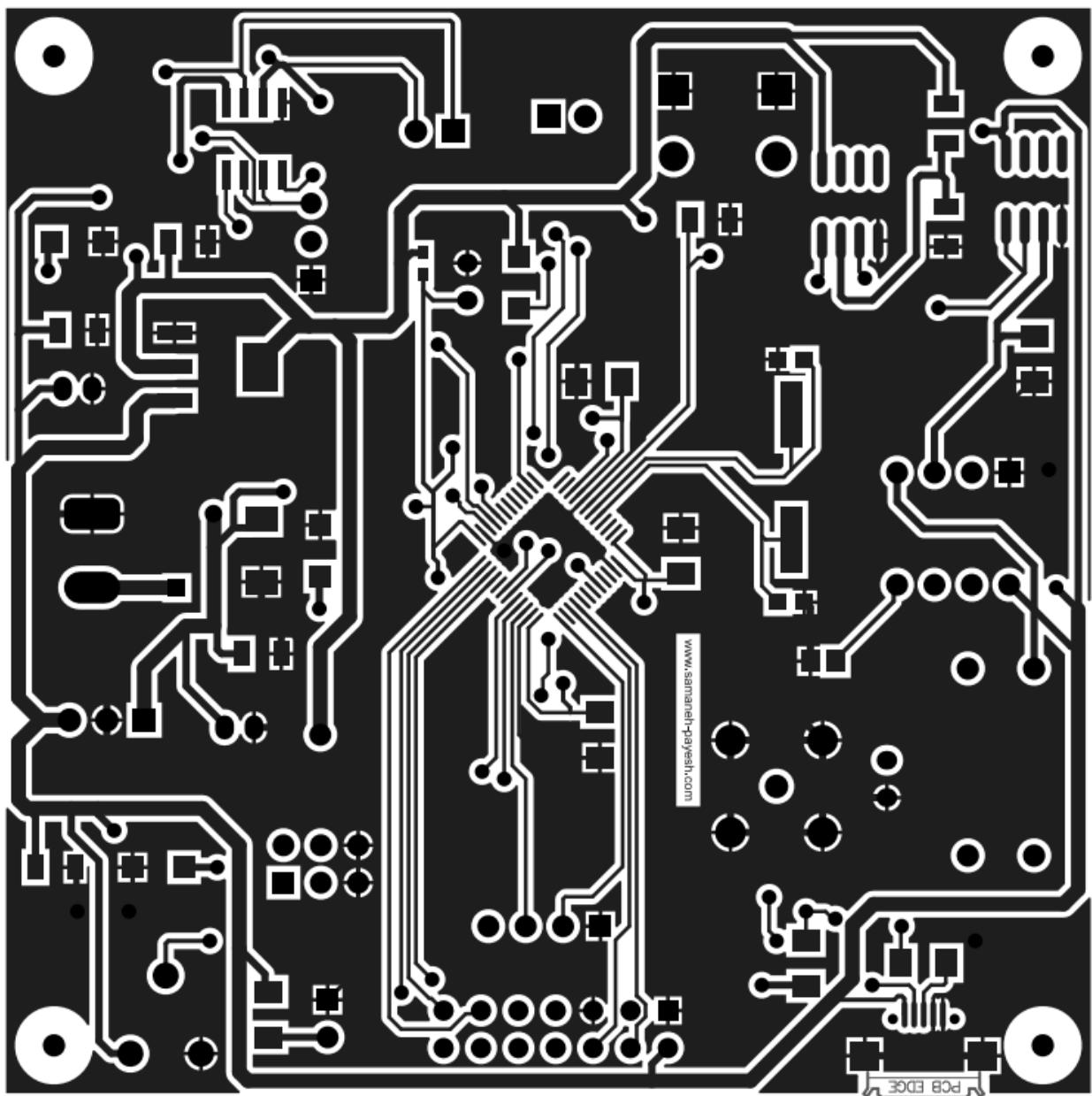
















University of Tehran  
College of Engineering  
School of Mechanical Engineering



# **Design and Implementation of Capacitive Level Meter Sensor**

Senior Design Project  
Mechanical Engineering B.Sc.

**Autor: Amir Mahdi Matin**

Supervisor: Dr. Moosa Ayati

August 2021