دانشگاه تهران
پردیس دانشکده‌های فنی
دانشکده مهندسی برق و کامپیوتر

ابزار دقیق

تمرین سری ششم

نام و نام خانوادگی:

امیرعلی دهقانی

شماره دانشجویی:

۸۱۰۱۰۲۴۴۳

فهرست مطالب

سوال ۱ **۲**
بررسی و نحوه عملکرد سنسور گاز MQ-4 ۲
شبیه‌سازی ۳
سوال ۲ **۴**
بررسی و نحوه عملکرد سنسور DHT11 ۴
شبیه‌سازی ۴
سوال ۳ **۷**
بررسی و نحوه عملکرد ماژول LDR ۷
شبیه‌سازی ۷
سوال ۴ **۱۰**
بررسی عملکرد سنسورهای دبی با خروجی پالسی ۱۰
شبیه‌سازی ۱۰
سوال ۵ **۱۲**
معادله مشخصه سنسور فشار MPX4115 ۱۲
شبیه‌سازی ۱۲
سوال ۶ **۱۴**
شبیه‌سازی ۱۴
سوال ۷ **۱۶**
بررسی سنسور BMP180 و ارتباط سریال ۱۶
شبیه‌سازی ۱۶

سوال ۱

بررسی و نحوه عملکرد سنسور گاز MQ-4

سنسور MQ-4 یکی از سنسورهای معروف و پرکاربرد برای تشخیص گاز متان (CH_4) و گازهای طبیعی است. نحوه کار این سنسور نسبتا ساده و بر اساس تغییر مقاومت الکتریکی یک ماده نیمه‌هادی است.

ساختار و مکانیزم عملکرد سنسور:

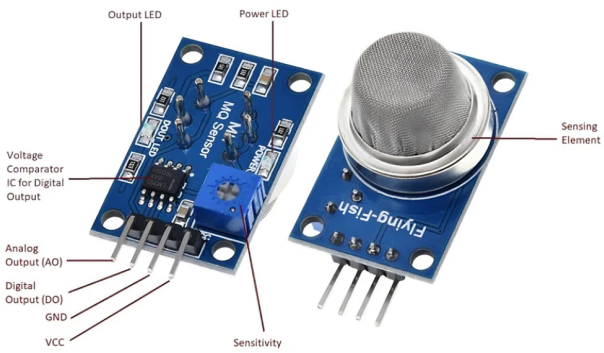
در داخل این سنسور یک هیتر کوچک قرار دارد که معمولا با ولتاژ ۵ ولت کار می‌کند. این هیتر، سطح ماده حساس سنسور (که معمولا از جنس دی‌اکسید قلع یا SnO_2 است) را تا دمای مشخصی گرم می‌کند تا شرایط برای واکنش با گازها فراهم شود.

در هوای تمیز، مولکول‌های اکسیژن هوا روی سطح گرم‌شده‌ی سنسور می‌نشینند و الکترون‌های آزاد ماده نیمه‌هادی را به خود جذب می‌کنند. این کار باعث می‌شود مقاومت الکتریکی سنسور بسیار بالا برود و جریان کمی از آن عبور کند.

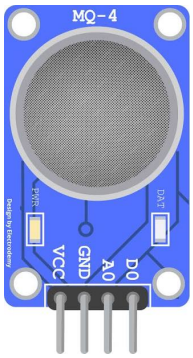
وقتی گاز متان یا گاز شهری در محیط پخش می‌شود، این گازها با اکسیژن‌های جذب‌شده روی سطح سنسور واکنش می‌دهند. این واکنش شیمیایی باعث می‌شود الکترون‌های گیر افتاده دوباره آزاد شوند و در نتیجه، مقاومت الکتریکی سنسور به شدت افت پیدا کند.

خروجی‌های سنسور:

- **خروجی آنالوگ (پایه‌ی AO):** با تغییر مقاومت سنسور، ولتاژ این پایه به صورت پیوسته تغییر می‌کند. هر چه غلظت گاز در محیط بیشتر باشد، ولتاژ این پایه بالاتر می‌رود.
- **خروجی دیجیتال (پایه‌ی DO):** بر روی ماژول این سنسور معمولا یک آی‌سی مقایسه‌کننده (مانند LM393) و یک پتانسیومتر قرار دارد. ما می‌توانیم با پیچاندن پتانسیومتر، یک Threshold حساسیت تعریف کنیم. به محض اینکه غلظت گاز از این حد بیشتر بشود، خروجی دیجیتال وضعیت خود را تغییر می‌دهد که می‌توانیم از آن مستقیما برای اتصال به پایه‌های ورودی دیجیتال میکروکنترلر استفاده کنیم.



(آ) نمای ظاهری ماژول سنسور گاز MQ-4



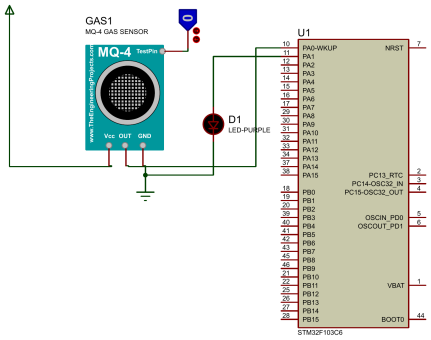
(ب) نمای شماتیک ماژول سنسور گاز MQ-4

شکل ۱: سنسور گاز MQ-4 و پایه‌های آن

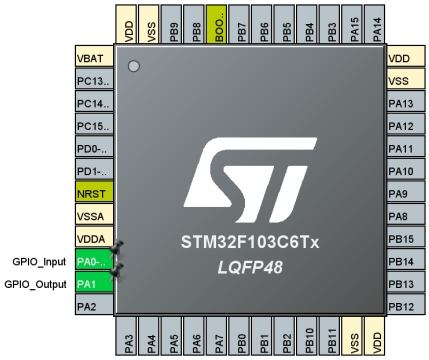
شبیه‌سازی

برای شبیه‌سازی این سیستم در نرم‌افزار پروتئوس، ابتدا میکروکنترلر STM32F103 در مدار قرار گرفت. خروجی DO از سنسور MQ-4 به پایه PA0 متصل شد تا میکروکنترلر بتواند وضعیت گاز محیط را بررسی کند. همچنین یک LED به پایه خروجی PA1 متصل شد تا با تشخیص گاز، هشدار بدهد. برای شبیه‌سازی حضور یا عدم حضور گاز، یک کلید منطقی در پایه تست سنسور قرار داده شد.

در STM32CubeIDE، پایه PA0 برای ورودی و پایه PA1 برای خروجی تنظیم شدند.



(آ) شماتیک مدار سنسور گاز در پروتئوس

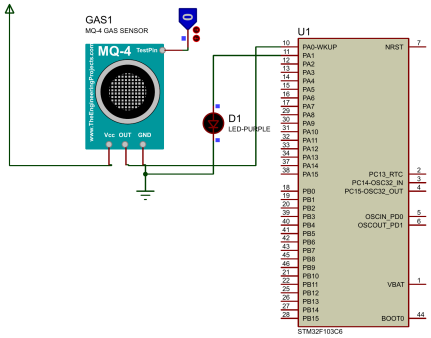


(ب) تنظیمات پایه‌ها در نرم‌افزار STM32CubeIDE

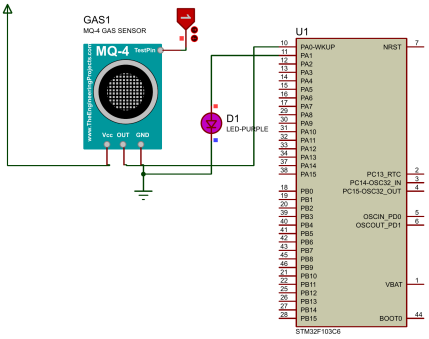
شکل ۲: طراحی سخت‌افزاری و تنظیمات اولیه میکروکنترلر

روند کار به این صورت است که میکروکنترلر به طور مداوم پایه ورودی متصل به سنسور را می‌خواند. اگر مقدار خوانده شده برابر با یک منطقی باشد (به این معنی که سنسور نشتی گاز را تشخیص داده است)، میکروکنترلر بلافاصله پایه خروجی خود را یک کرده و LED هشدار را روشن می‌کند. در غیر این صورت، پایه خروجی در وضعیت صفر باقی مانده و LED خاموش می‌ماند.

با اجرای شبیه‌سازی و تغییر وضعیت کلید متصل به پایه تست، عملکرد مدار بررسی شد. ویدیوی شبیه‌سازی این مدار در فولدر Q1 قرار دارد. در تصاویر زیر عملکرد مدار در دو حالت هوای پاک و تشخیص گاز قابل مشاهده است.



(آ) عدم تشخیص گاز (LED خاموش)



(ب) تشخیص نشتی گاز (LED روشن)

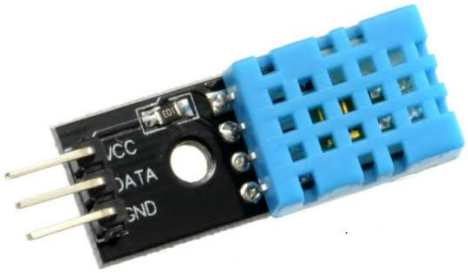
شکل ۳: خروجی شبیه‌سازی در حالت‌های مختلف

سوال ۲

بررسی و نحوه عملکرد سنسور DHT11

سنسور DHT11 یک سنسور ارزان و پرکاربرد برای اندازه‌گیری دما و رطوبت محیط است. در داخل این سنسور دو بخش اصلی وجود دارد: یک سنسور رطوبت خازنی و یک ترمیستور برای اندازه‌گیری دما. یک آی‌سی ساده هم در سنسور قرار دارد که مقادیر آنالوگ این دو بخش را می‌خواند و به سیگنال دیجیتال تبدیل می‌کند.

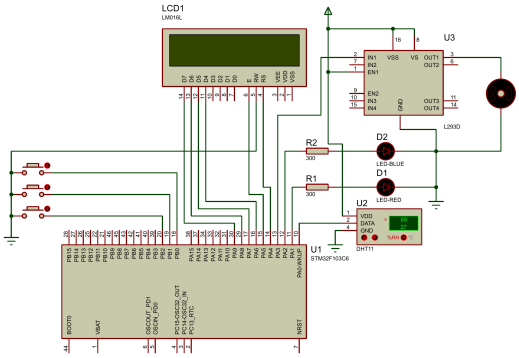
ارسال داده‌ها در این سنسور از طریق یک پروتکل ارتباطی تک‌سیم انجام می‌شود. میکروکنترلر ابتدا یک سیگنال شروع برای سنسور می‌فرستد. سنسور در جواب، یک بسته داده‌ی ۴۰ بیتی ارسال می‌کند. این ۴۰ بیت شامل مقادیر صحیح و اعشاری رطوبت، مقادیر صحیح و اعشاری دما و در نهایت یک بایت برای بررسی صحت داده‌ها است. میکروکنترلر با زمان‌بندی دقیق طول پالس‌ها، صفر و یک بودن هر بیت را تشخیص می‌دهد.



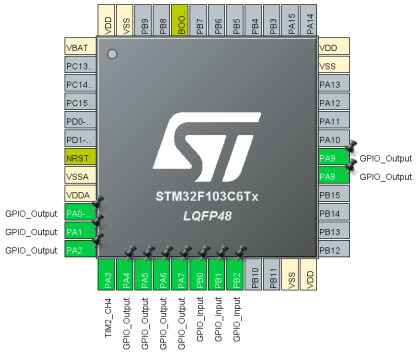
شکل ۴: ماژول سنسور DHT11

شبیه‌سازی

برای شبیه‌سازی این سیستم در نرم‌افزار پروتئوس، مدار شامل سنسور DHT11، نمایشگر LCD، سه کلید فشاری، دو LED (به عنوان هیتر و رطوبت‌ساز) و یک موتور DC با درایور بسته شد. در STM32CubeIDE پایه‌های متصل به نمایشگر و ال‌ای‌دی‌ها برای خروجی، پایه PA3 برای تولید موج PWM موتور، و پایه‌های PB0 تا PB2 برای کلیدها تنظیم شدند.



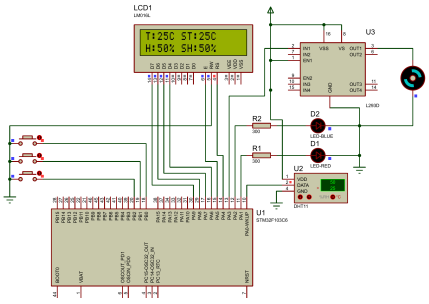
(آ) شماتیک کلی مدار سنسور دما و رطوبت



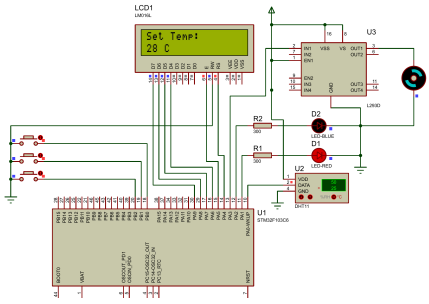
(ب) تنظیمات پایه‌ها در نرم‌افزار STM32CubeIDE

شکل ۵: طراحی سخت‌افزاری و تنظیمات اولیه میکروکنترلر

روند کار به این صورت است که سیستم در حالت پیش‌فرض مقادیر فعلی سنسور و مقادیر هدف را روی نمایشگر نشان می‌دهد. با زدن کلید Menu، می‌توان وارد منوهای تنظیم دما و رطوبت شد و با کلیدهای بالا و پایین، این مقادیر را تغییر داد. اگر دمای محیط کمتر از هدف باشد، هیتر روشن می‌شود. اگر رطوبت کمتر از هدف باشد، رطوبت‌ساز روشن می‌شود. در صورتی که دما از مقدار هدف بالاتر برود، موتور تهویه با موج PWM راه‌اندازی می‌شود که سرعت آن با افزایش اختلاف دما بیشتر می‌شود. در حالت پایدار که مقادیر سنسور دقیقا با مقادیر هدف برابر باشند، تمام خروجی‌ها خاموش می‌مانند. ویدیوی شبیه‌سازی این مدار در فولدر Q2 قرار دارد.

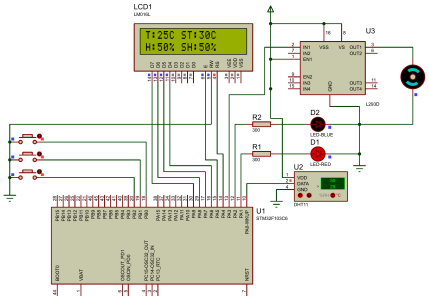


(آ) حالت اولیه و پایدار مدار (خروجی‌ها خاموش)

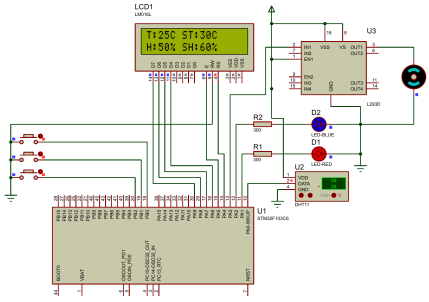


(ب) تغییر مقادیر هدف با استفاده از کلیدها در منو

شکل ۶: عملکرد رابط کاربری و منوهای سیستم

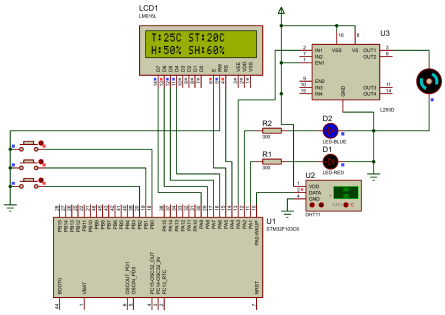


(آ) تشخیص افت دما و روشن شدن هیتر (LED قرمز)



(ب) تشخیص افت رطوبت و روشن شدن رطوبت‌ساز (LED آبی)

شکل ۷: عملکرد سیستم در پاسخ به افت دما و رطوبت



شکل ۸: تشخیص افزایش دما و روشن شدن موتور تهویه با موج PWM

سوال ۳

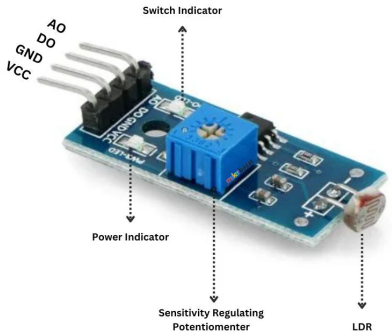
بررسی و نحوه عملکرد ماژول LDR

مقاومت وابسته به نور یا Light Dependent Resistor(LDR) قطعه‌ای است که مقاومت الکتریکی آن با توجه به شدت نور محیط تغییر می‌کند. در محیط‌های تاریک، مقاومت LDR بسیار بالا است و با تابش نور به سطح آن، این مقاومت به شدت کاهش می‌یابد. ماژول‌های LDR با استفاده از این ویژگی و یک مدار مقسم ولتاژ ساده، تغییرات مقاومت را به تغییرات ولتاژ تبدیل می‌کنند.

تفاوت خروجی‌های AO و DO:

- **خروجی آنالوگ (AO):** این پایه ولتاژ خروجی سنسور را به صورت پیوسته نشان می‌دهد. میکروکنترلر می‌تواند با استفاده از ADC این ولتاژ را خوانده و شدت نور محیط را به صورت دقیق اندازه‌گیری کند.
- **خروجی دیجیتال (DO):** این پایه تنها می‌تواند دو وضعیت منطقی صفر و یک (به معنای روشن یا تاریک بودن محیط) را نشان دهد و مستقیما به پایه‌های ورودی دیجیتال میکروکنترلر متصل می‌شود. وضعیت این خروجی توسط یک آی‌سی مقایسه‌کننده (مانند LM393) روی ماژول تعیین می‌شود.

نقش پارامتر Threshold: پارامتر Threshold، مرز بین روشنایی و تاریکی را برای ماژول مشخص می‌کند. مقایسه‌کننده موجود روی برد، ولتاژ آنالوگ سنسور را با این مقدار Threshold که توسط پتانسیومتر تنظیم می‌شود، مقایسه می‌کند. هر زمان که سطح نور از این حد بیشتر یا کمتر شود، خروجی دیجیتال تغییر وضعیت می‌دهد. با تنظیم این پارامتر، می‌توانیم حساسیت مدار را برای محیط‌های نوری مختلف تنظیم کنیم.

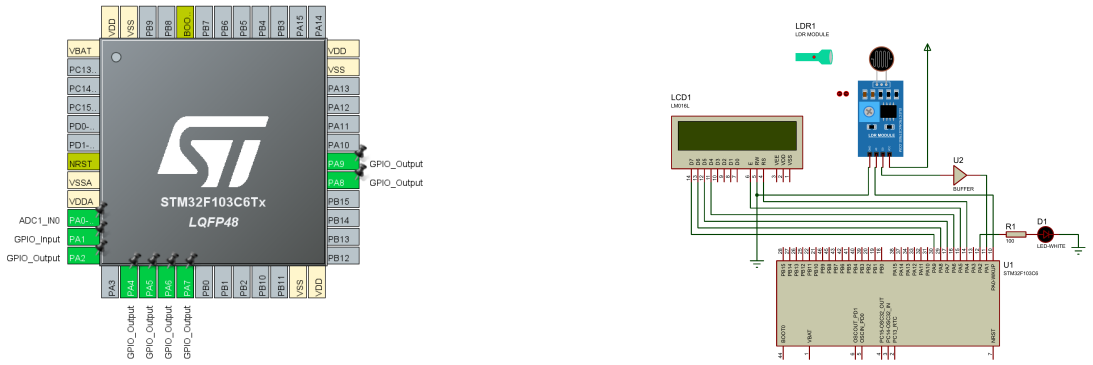


شکل ۹: ماژول سنسور LDR

شبیه‌سازی

در این بخش، مدار مورد نیاز شامل میکروکنترلر، نمایشگر LCD، ماژول LDR، یک بافر منطقی و یک LED در نرم‌افزار پروتئوس شبیه‌سازی شد. پایه AO سنسور مستقیما به پایه PA0 میکروکنترلر متصل شد تا مقادیر پیوسته ولتاژ توسط ADC خوانده شود. خروجی DO نیز در ابتدا برای ایزولاسیون از یک بافر عبور داده شد و سپس به پایه PA1 متصل شد. در نرم‌افزار STM32CubeIDE، واحد ADC1 در حالت Continuous Conversion Mode تنظیم شد.

کد به این صورت است که که مقدار دیجیتال تبدیل شده، خوانده شده و با استفاده از رابطه $V = \frac{ADC \times ۳/۳}{۴۰۹۵}$ به ولتاژ معادل تبدیل و روی نمایشگر نشان داده می‌شود. به صورت هم‌زمان، وضعیت پایه دیجیتال اسکن شده و با تشخیص نور کافی (صفر شدن خروجی دیجیتال ماژول)، میکروکنترلر فرمان روشن شدن LED متصل به پایه PA2 را صادر می‌کند.



(آ) شماتیک مدار سنسور LDR در پروتئوس

(ب) تنظیمات پایه‌ها در نرم‌افزار STM32CubeIDE

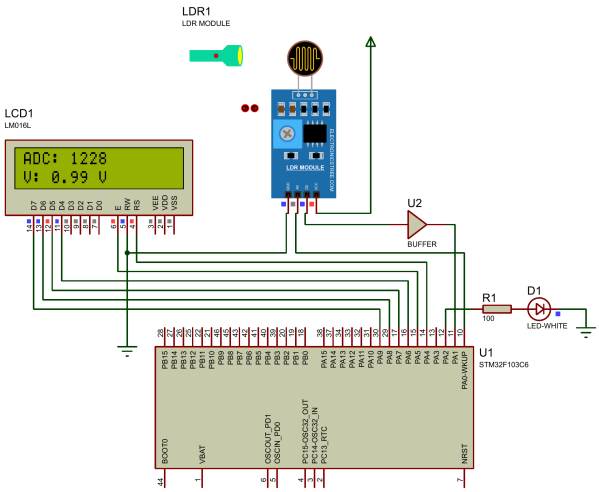
شکل ۱۰: طراحی سخت‌افزاری و تنظیمات اولیه میکروکنترلر

پارامتر SRV: پارامتر SRV مخفف Series Resistor Value (مقدار مقاومت سری) است. سنسورهای LDR به تنهایی فقط مقاومت خود را تغییر می‌دهند و نمی‌توانند مستقیماً تغییرات ولتاژ تولید کنند. برای حل این مشکل در ماژول‌های واقعی، سنسور LDR را با یک مقاومت ثابت سری می‌کنند تا یک مدار مقسم ولتاژ تشکیل شود. خروجی آنالوگ سنسور، دقیقا ولتاژ نقطه مشترک بین این دو مقاومت است. پارامتر SRV در نرم‌افزار پروتئوس، اندازه همین مقاومت ثابت را مشخص می‌کند که در ماژول‌های استاندارد معمولاً برابر با ۱۰ کیلو اهم است.

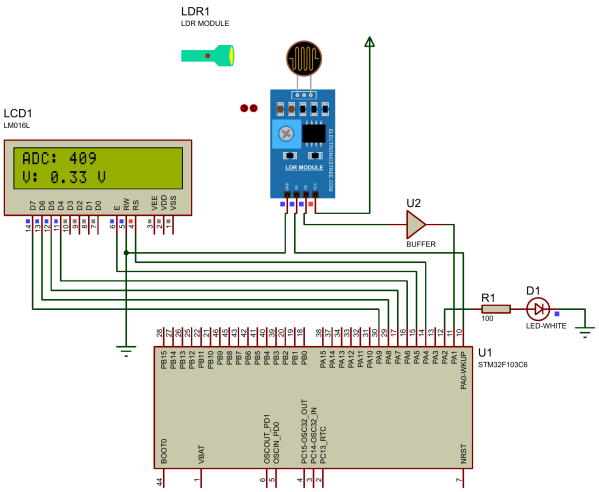
برای بررسی عملکرد ماژول در حساسیت‌های مختلف نوری، پارامتر SRV سنسور در پروتئوس روی $۱۰k$ تنظیم شد و مدار به ازای سه مقدار مختلف برای Threshold آزمایش شد. با تغییر نور در شبیه‌ساز، نقاط مرزی سوئیچ شدن خروجی دیجیتال ثبت شد. نتایج این تست‌ها به شرح زیر است:

- **تست اول (Threshold = 1):** مدار دارای بیشترین حساسیت بود. با کمترین افزایش نور، ولتاژ سنسور به ۰/۳۳ ولت (مقدار ADC برابر ۴۰۹) رسید و LED روشن شد.
- **تست دوم (Threshold = 3):** برای روشن شدن LED به شدت نور بیشتری نسبت به حالت قبل نیاز بود و نقطه سوئیچ به ولتاژ ۰/۹۹ ولت (مقدار ADC برابر ۱۲۲۸) تغییر کرد.
- **تست سوم (Threshold = 5):** حساسیت مدار به شدت کاهش یافت و LED تنها با تابش نور بسیار شدید تغییر وضعیت داد، که در این حالت ولتاژ سنسور به ۱/۳۲ ولت (مقدار ADC برابر ۱۶۳۸) رسیده بود.

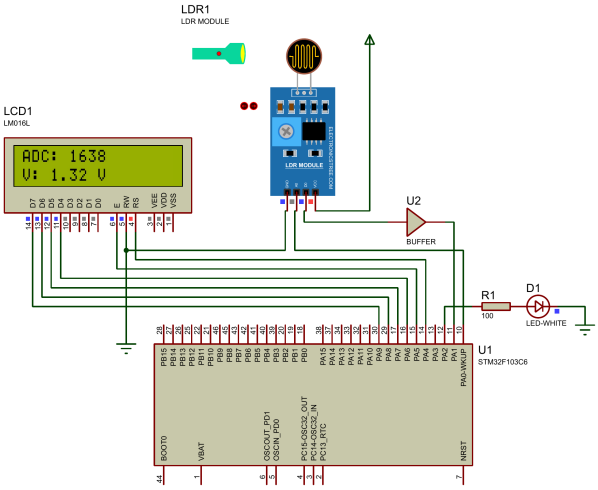
نتیجه‌گیری: همان‌طور که مشخص است، با افزایش مقدار Threshold، ولتاژ مرجع مقایسه‌کننده روی ماژول افزایش می‌یابد. در نتیجه، برای اینکه سنسور بتواند ولتاژ آنالوگ خود را از این مرجع جدید عبور دهد و خروجی دیجیتال را فعال (صفر) کند، نیاز به شدت نور بسیار بیشتری دارد. این قابلیت در محیط‌های واقعی از طریق پتانسیومتر روی ماژول برای تنظیم مرز تاریکی و روشنایی استفاده می‌شود.



(ب) نقطه سوئیچ خروجی به ازای Threshold = 3



(آ) نقطه سوئیچ خروجی به ازای Threshold = 1



(ج) نقطه سوئیچ خروجی به ازای Threshold = 5

شکل ۱۱: تست حساسیت مدار و بررسی عملکرد خروجی دیجیتال در مقادیر مختلف Threshold

ویدیوی کامل شبیه‌سازی این بخش در فولدر Q3 قرار دارد.

سوال ۴

بررسی عملکرد سنسورهای دبی با خروجی پالسی

سنسورهای دبی با خروجی پالسی دارای یک مکانیزم مکانیکی-الکترونیکی ساده هستند. در مسیر جریان سیال، یک توربین یا پروانه کوچک قرار دارد که با عبور مایع به چرخش در می‌آید. روی پره‌های این توربین قطعات آهنربایی نصب شده است و در بدنه سنسور نیز یک حسگر Hall Effect وجود دارد. هر بار که پره‌های آهنربایی از مقابل حسگر عبور می‌کنند، میدان مغناطیسی باعث تغییر وضعیت خروجی حسگر شده و یک پالس دیجیتال (موج مربعی) تولید می‌شود.

سرعت چرخش پروانه توربین، وابستگی مستقیمی به سرعت و حجم سیال عبوری در واحد زمان دارد. افزایش دبی باعث سریع‌تر چرخیدن پروانه شده و در نتیجه، فرکانس افزایش می‌یابد. همچنین کاهش دبی منجر به کند شدن حرکت پروانه و کاهش فرکانس موج خروجی می‌شود.

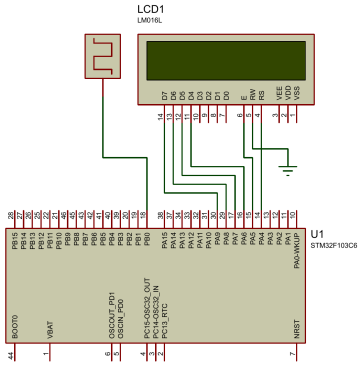
بنابراین، میکروکنترلر با اندازه‌گیری فرکانس این موج مربعی و استفاده از ضریب کالیبراسیون مخصوص سنسور، می‌تواند مقدار دقیق دبی جریان را محاسبه کند.

شکل ۱۲: سنسور دبی آب

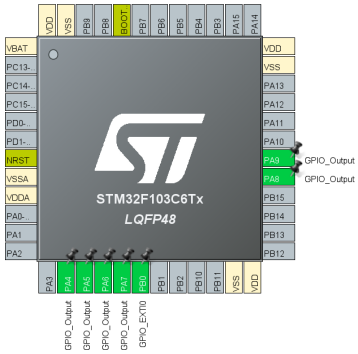
شبیه‌سازی

در این بخش، مدار مورد نیاز شامل میکروکنترلر، نمایشگر LCD و قطعه CLOCK در نرم‌افزار پروتئوس بسته شد. قطعه CLOCK برای شبیه‌سازی پالس‌های خروجی سنسور دبی استفاده شده و به پایه PB0 میکروکنترلر متصل شد. در تنظیمات STM32CubeIDE، این پایه در حالت Interrupt خارجی با حساسیت به لبه بالارونده تنظیم شد تا بتواند تعداد پالس‌های ورودی را بشمارد.

روند کد به این صورت است که میکروکنترلر در یک بازه زمانی یک ثانیه‌ای، تعداد پالس‌های شمرده شده توسط Interrupt را به عنوان فرکانس در نظر می‌گیرد. سپس با استفاده از رابطه $Q = \frac{f}{۷/۵}$ مقدار دبی جریان بر حسب لیتر بر دقیقه محاسبه شده و همراه با فرکانس روی نمایشگر چاپ می‌شود.



(آ) شماتیک مدار سنسور دبی

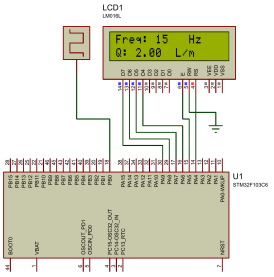


(ب) تنظیمات پایه‌ها در نرم‌افزار STM32CubeIDE

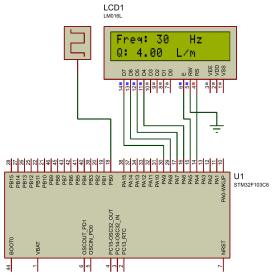
شکل ۱۳: طراحی سخت‌افزاری و تنظیمات میکروکنترلر

برای تست عملکرد سیستم، فرکانس قطعه CLOCK به ترتیب روی مقادیر ۱۵، ۳۰ و ۶۰ هرتز تنظیم شد و مقادیر محاسبه شده توسط میکروکنترلر مورد بررسی قرار گرفت. نتایج این آزمایش‌ها به شرح زیر است:

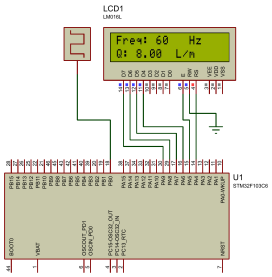
- **فرکانس ۱۵ هرتز:** میکروکنترلر فرکانس را به درستی تشخیص داده و مقدار دبی جریان را برابر ۲٫۰۰ لیتر بر دقیقه محاسبه کرد.
- **فرکانس ۳۰ هرتز:** با دو برابر شدن فرکانس، مقدار دبی نیز دو برابر شده و عدد ۴٫۰۰ لیتر بر دقیقه روی نمایشگر ثبت شد.
- **فرکانس ۶۰ هرتز:** سیستم به درستی دبی ۸٫۰۰ لیتر بر دقیقه را محاسبه کرد که نشان‌دهنده رابطه کاملا خطی بین فرکانس ورودی و دبی عبوری است.



(آ) تست مدار با فرکانس ۱۵ هرتز



(ب) تست مدار با فرکانس ۳۰ هرتز



(ج) تست مدار با فرکانس ۶۰ هرتز

شکل ۱۴: بررسی عملکرد میکروکنترلر در فرکانس‌های ورودی مختلف

سوال ۵

معادله مشخصه سنسور فشار MPX4115

سنسور MPX4115 یک سنسور فشار مطلق پیزومقاومتی است که فشار محیط را اندازه گیری کرده و به یک ولتاژ آنالوگ خطی تبدیل می‌کند. طبق دیتاشیت این قطعه (لینک دیتاشیت)، تابع تبدیل به صورت زیر تعریف می‌شود:

$$V_{out} = V_S \times (۰/۰۰۹ \times P - ۰/۰۹۵)$$

در این رابطه، V_S ولتاژ تغذیه سنسور، V_{out} ولتاژ خروجی سنسور و P فشار بر حسب کیلوپاسکال است. میکروکنترلر ولتاژ آنالوگ خروجی را از طریق ADC با رزولوشن ۱۲ بیت می‌خواند. رابطه تبدیل مقدار دیجیتال به ولتاژ معادل به صورت زیر است:

$$V_{out} = \frac{ADC \times V_{ref}}{۴۰۹۵}$$

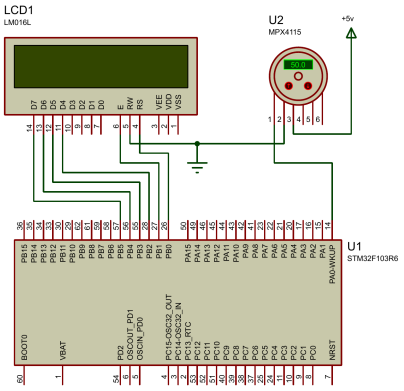
با جایگذاری ولتاژ محاسبه شده در تابع تبدیل سنسور و مرتب سازی فرمول بر اساس فشار، معادله مشخصه نهایی که در نرم افزار میکروکنترلر برای محاسبه فشار استفاده می‌شود، به دست می‌آید:

$$P = \frac{\frac{V_{out}}{V_S} + ۰/۰۹۵}{۰/۰۰۹}$$

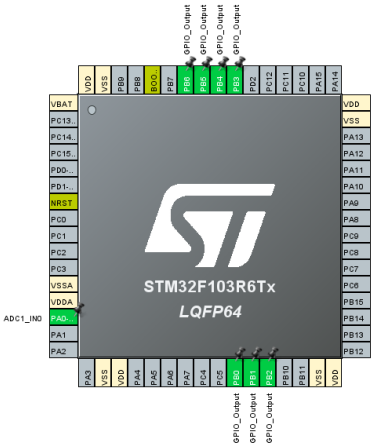
شبیه‌سازی

در این بخش، مدار مورد نیاز شامل میکروکنترلر STM32F103R6، سنسور فشار MPX4115 و نمایشگر LCD در نرم‌افزار پروتئوس بسته شد. پایه خروجی آنالوگ سنسور مستقیما به پایه PA0 میکروکنترلر متصل شد. در تنظیمات STM32CubeIDE، این پایه به عنوان ورودی ADC1 با رزولوشن ۱۲ بیت تنظیم شد و پایه‌های PB0 تا PB6 نیز به عنوان خروجی برای LCD انتخاب شدند.

روند کار به این صورت است که میکروکنترلر به صورت دوره‌ای ADC را فعال کرده و ولتاژ خروجی سنسور را می‌خواند. سپس با استفاده از معادله مشخصه سنسور، این ولتاژ به مقدار فشار معادل بر حسب کیلوپاسکال تبدیل شده و روی نمایشگر نشان داده می‌شود. با صفر کردن خطای شبیه‌سازی (Error band) در پروتئوس، مقادیر محاسبه شده توسط میکروکنترلر دقیقا با مقادیر واقعی سنسور مطابقت دارند.



(آ) شماتیک مدار سنسور فشار MPX4415

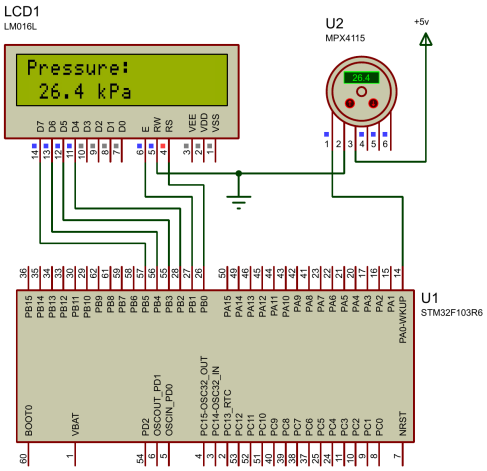


(ب) تنظیمات پایه‌ها در نرم‌افزار STM32CubeIDE

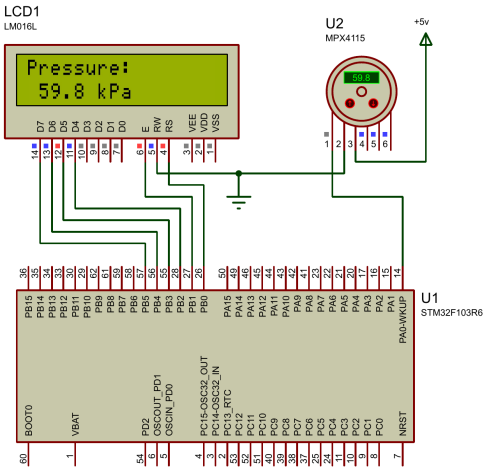
شکل ۱۵: طراحی سخت‌افزاری و تنظیمات میکروکنترلر

برای تست عملکرد سیستم، فشار محیط در شبیه‌سازی تغییر داده شد و خروجی میکروکنترلر مورد بررسی قرار گرفت. نتایج این آزمایش‌ها به صورت زیر است:

- **فشار ۵۰/۰ کیلوپاسکال:** سیستم به درستی ولتاژ سنسور را خوانده و با استفاده از معادله مشخصه، مقدار دقیق ۵۰/۰ کیلوپاسکال را محاسبه و روی نمایشگر چاپ کرد.
- **فشار ۲۶/۴ کیلوپاسکال:** با کاهش فشار، مقدار محاسبه شده توسط میکروکنترلر نیز بدون خطا و با دقت بالا آپدیت شد.
- **فشار ۵۹/۸ کیلوپاسکال:** در تست افزایش فشار نیز سیستم پایداری خود را نشان داده و عدد صحیح را روی نمایشگر ثبت کرد.



(آ) تست مدار با فشار ۲۶/۴ کیلوپاسکال



(ب) تست مدار با فشار ۵۹/۸ کیلوپاسکال

شکل ۱۶: بررسی عملکرد سیستم در فشارهای مختلف

سوال ۶

در این سوال، به دلیل عدم وجود قطعه فیزیکی تانک در پروتئوس، برای شبیه‌سازی سطح آب داخل تانک از یک پتانسیومتر استفاده می‌شود. پتانسیومتر به عنوان یک مدار مقسم ولتاژ عمل کرده و ولتاژی متناسب با درصد پر بودن تانک تولید می‌کند. این ولتاژ آنالوگ توسط ADC میکروکنترلر خوانده شده و به درصد تبدیل می‌شود.

میکروکنترلر به صورت پیوسته درصد محاسبه شده را بررسی کرده و وضعیت خروجی‌ها را به صورت زیر تعیین می‌کند:

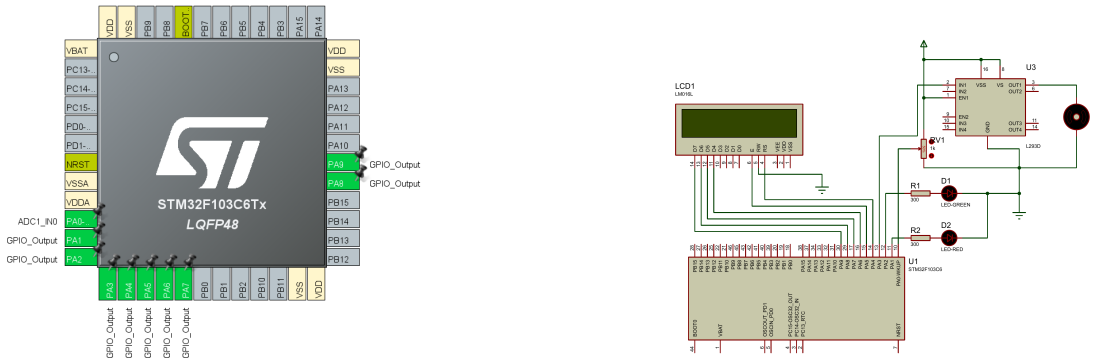
- **وضعیت بحرانی (کمتر از ۲۵ درصد):** در این حالت فرمان روشن شدن به موتور DC (پمپ آب) ارسال می‌شود تا تانک را پر کند و همزمان LED قرمز برای هشدار روشن می‌شود.
- **وضعیت نرمال (بیشتر یا مساوی ۲۵ درصد):** با رسیدن سطح آب به حد مجاز، پمپ متوقف شده، LED قرمز خاموش و LED سبز به نشانه وضعیت پایدار روشن می‌شود.

در تمام این مراحل، نمایشگر LCD درصد دقیق پر بودن تانک و وضعیت روشن یا خاموش بودن پمپ را نمایش می‌دهد.

شبیه‌سازی

در این بخش، مدار مورد نیاز شامل میکروکنترلر STM32F103C6، درایور موتور L293D، یک موتور DC، دو عدد LED و نمایشگر LCD در نرم‌افزار پروتئوس بسته شد. برای شبیه‌سازی سطح آب، از یک پتانسیومتر استفاده شد که خروجی آن به پایه PA0 (ورودی ADC) متصل گردید. پایه‌های PA4 تا PA9 برای ارتباط با نمایشگر، پایه PA1 برای LED قرمز (وضعیت بحرانی)، پایه PA2 برای LED سبز (وضعیت نرمال) و پایه PA3 برای فرمان دادن به درایور موتور تنظیم شدند.

در نرم‌افزار STM32CubeIDE، میکروکنترلر به گونه‌ای برنامه‌ریزی شد تا به صورت پیوسته ولتاژ آنالوگ پتانسیومتر را خوانده و به درصد تبدیل کند. در صورتی که این مقدار کمتر از ۲۵ درصد باشد، سیستم وارد وضعیت بحرانی شده، پمپ روشن و LED قرمز فعال می‌شود. با رسیدن سطح آب به مقادیر بیشتر یا مساوی ۲۵ درصد، سیستم به حالت پایدار بازگشته، پمپ متوقف و LED سبز روشن می‌گردد.



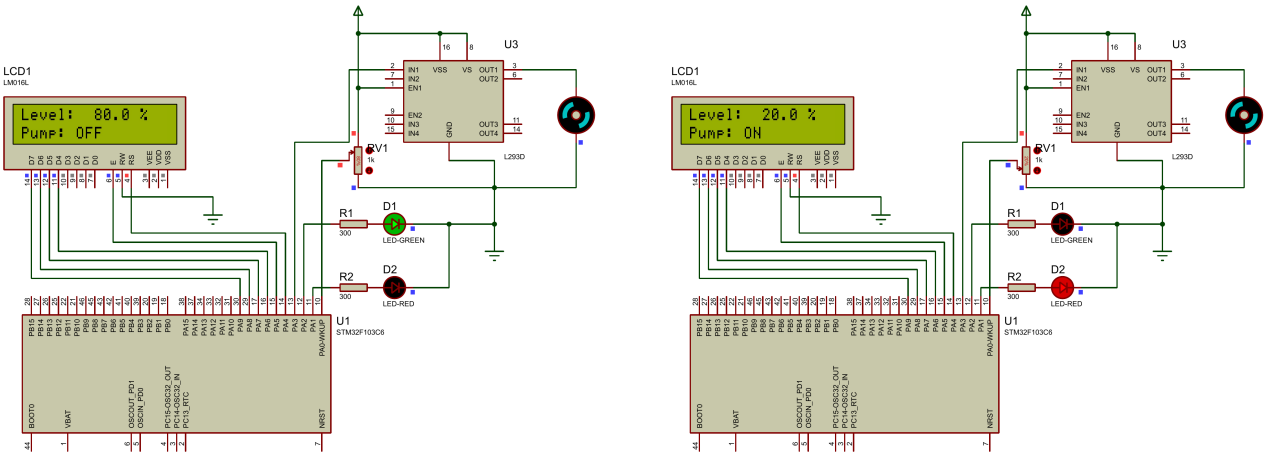
(آ) شماتیک مدار کنترل سطح مایع

(ب) تنظیمات پایه‌ها در نرم‌افزار STM32CubeIDE

شکل ۱۷: طراحی سخت‌افزاری و تنظیمات میکروکنترلر

برای بررسی عملکرد مدار، مقدار پتانسیومتر در شبیه‌ساز تغییر داده شد تا حالت‌های مختلف سطح آب تست شود:

- **بررسی وضعیت بحرانی (سطح ۲۰٪ درصد):** همان‌طور که در نتایج مشخص است، با کاهش سطح آب به زیر مرز ۲۵ درصد، میکروکنترلر فرمان روشن شدن پمپ را صادر کرده و LED قرمز روشن می‌شود. عبارت روی نمایشگر نیز به درستی وضعیت ON را برای پمپ نشان می‌دهد.
- **بررسی وضعیت نرمال (سطح ۸۰٪ درصد):** با افزایش سطح آب و عبور از مرز مجاز، سیستم پمپ را متوقف کرده، LED قرمز خاموش و LED سبز روشن می‌شود و وضعیت پمپ در نمایشگر به OFF تغییر می‌کند.



(آ) تست مدار در وضعیت بحرانی (سطح زیر ۲۵ درصد)

(ب) تست مدار در وضعیت نرمال (سطح بالای ۲۵ درصد)

شکل ۱۸: بررسی عملکرد سیستم کنترل سطح در شرایط مختلف

سوال ۷

بررسی سنسور BMP180 و ارتباط سریال

سنسور BMP180 یک سنسور دیجیتال دقیق برای اندازه‌گیری فشار بارومتریک و دمای محیط است که از پروتکل ارتباطی I2C برای انتقال داده‌ها به میکروکنترلر استفاده می‌کند. طبق دیتاشیت این قطعه (لینک دیتاشیت)، برای محاسبه ارتفاع تقریبی از سطح دریا بر اساس فشار هوا، از فرمول ساده‌شده بارومتریک استفاده می‌شود:

$$h = ۴۴۳۳۰ \times \left(۱ - \left(\frac{P}{P_۰}\right)^{۰/۱۹۰۳}\right)$$

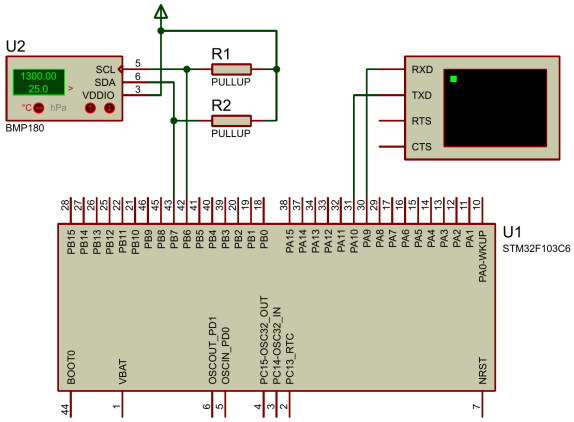
در این رابطه، h ارتفاع بر حسب متر، P فشار خوانده شده از سنسور بر حسب هکتوپاسکال و $P_۰$ فشار مرجع در سطح دریا است که معمولا مقدار استاندارد ۱۰۱۳/۲۵ هکتوپاسکال برای آن در نظر گرفته می‌شود.

شکل ۱۹: سنسور BMP180

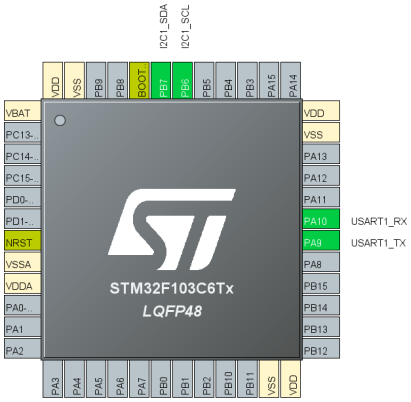
برای نمایش داده‌ها و پیام‌های هشدار، از ابزار Virtual Terminal در نرم‌افزار پروتئوس استفاده شده است که عملکردی مشابه Serial Monitor دارد. این ارتباط از طریق USART میکروکنترلر برقرار می‌شود. اتصال پایه‌های ارتباط سریال باید به صورت ضربدری انجام شود؛ به این معنی که پایه فرستنده (TX) میکروکنترلر باید به پایه گیرنده (RXD) ترمینال مجازی متصل شده و پایه گیرنده (RX) میکروکنترلر به پایه فرستنده (TXD) ترمینال مجازی وصل بشود.

شبیه‌سازی

در این بخش، مدار مورد نیاز شامل میکروکنترلر STM32F103C6، سنسور BMP180 و یک Virtual Terminal در نرم‌افزار پروتئوس بسته شد. برای برقراری ارتباط I2C، پایه‌های SCL و SDA سنسور به ترتیب به پایه‌های PB6 و PB7 میکروکنترلر متصل شده و با استفاده از مقاومت‌های Pull-up به تغذیه وصل شدند. همچنین پایه VDDIO سنسور نیز به تغذیه متصل شد. برای مشاهده خروجی‌ها، پایه Virtual Terminal RXD به پایه فرستنده سریال (PA9) و پایه TXD آن به گیرنده سریال (PA10) میکروکنترلر متصل شد.



(آ) شماتیک کامل مدار سنسور فشار و ترمینال سریال



(ب) تنظیمات پایه‌ها در نرم‌افزار STM32CubeIDE

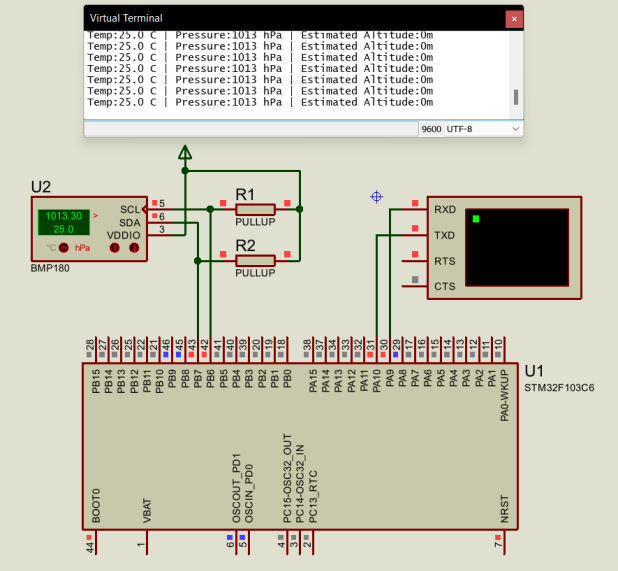
شکل ۲۰: طراحی سخت‌افزاری و تنظیمات میکروکنترلر

برای بخش برنامه‌نویسی میکروکنترلر، از کتابخانه استاندارد HAL توسعه داده شده برای این سنسور (لینک مخزن گیت‌هاب) استفاده شد. عملکرد نرم‌افزار به این صورت است که میکروکنترلر ابتدا تنظیمات واحد I2C را انجام داده و مقادیر اولیه و ضرایب کالیبراسیون را از حافظه EEPROM سنسور می‌خواند.

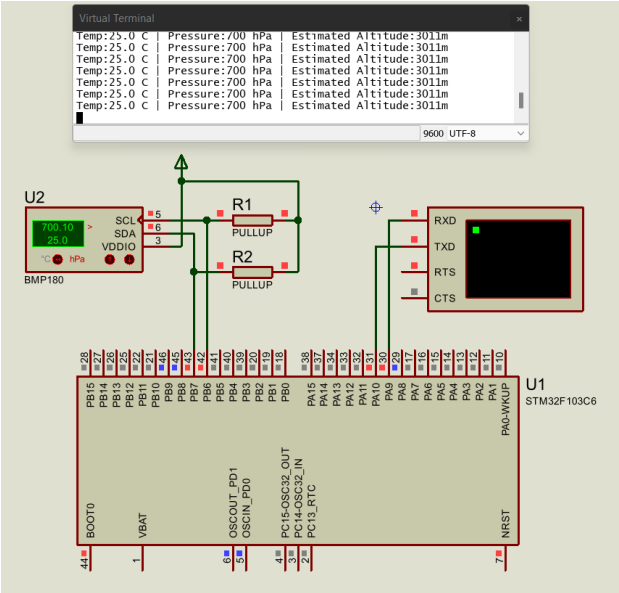
در حلقه اصلی برنامه، میکروکنترلر به صورت مداوم داده‌های خام دما و فشار را از سنسور دریافت کرده و با ترکیب آن‌ها با ضرایب کالیبراسیون، مقادیر واقعی را محاسبه می‌کند. سپس با قرار دادن فشار محاسبه شده در فرمول بارومتریک، ارتفاع تقریبی از سطح دریا به دست می‌آید. به منظور بهینه‌سازی و جلوگیری از پر شدن حافظه Flash میکروکنترلر، از توابع سنگین پردازش اعداد اعشاری استفاده نشد؛ بلکه مقادیر اعشاری به صورت ریاضی به بخش‌های صحیح و اعشار تجزیه شده و در قالب یک رشته متنی ترکیب می‌شوند. این رشته در نهایت از طریق پروتکل USART به Virtual Terminal ارسال می‌شود. همچنین یک مکانیزم کنترلی در کد تنظیم شده است تا به صورت پیوسته دمای محیط را بررسی کرده و در صورت عبور آن از مرز ۴۰ درجه سانتی‌گراد، یک پیغام هشدار به خروجی اضافه کند.

برای تایید درستی عملکرد مدار، مقادیر دما و فشار در شبیه‌سازی تغییر داده شد که نتایج آن به صورت زیر است:

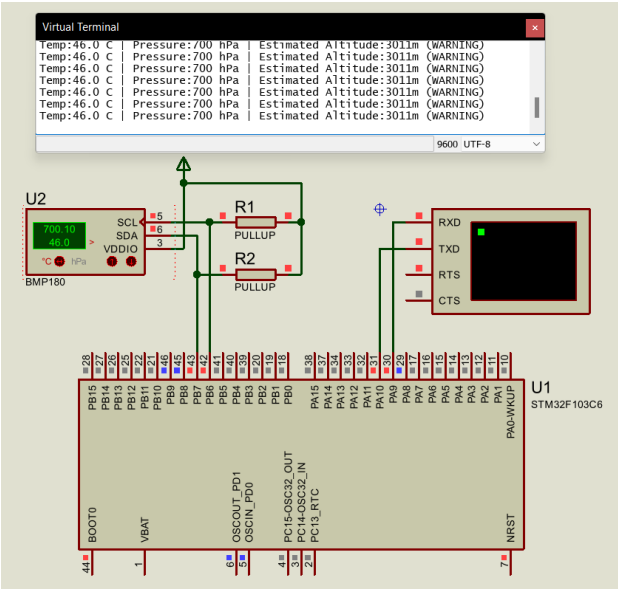
- **وضعیت سطح دریا (نرمال):** در دمای ۲۵٫۰ درجه و فشار استاندارد ۱۰۱۳ هکتوپاسکال، سیستم به درستی ارتفاع را صفر متر محاسبه و چاپ کرد.
- **وضعیت ارتفاعات (کاهش فشار):** با ثابت نگه داشتن دما و کاهش فشار به ۷۰۰ هکتوپاسکال، میکروکنترلر با دقت بالا ارتفاع تقریبی ۳۰۱۱ متر را محاسبه کرده و روی Virtual Terminal نشان داد.
- **وضعیت هشدار دما:** با افزایش دما به ۴۶٫۰ درجه سانتی‌گراد، سیستم بلافاصله تغییرات را تشخیص داده و برچسب (WARNING) را به انتهای اطلاعات چاپ شده اضافه کرد.



(آ) تست اول: فشار استاندارد سطح دریا



(ب) تست دوم: کاهش فشار و افزایش ارتفاع



(ج) تست سوم: افزایش دما و نمایش پیغام هشدار

شکل ۲۱: بررسی عملکرد سیستم و خروجی‌های چاپ شده روی ترمینال سریال