

دانشگاه دامغان

دانشگاه دامغان

دانشکده فنی و مهندسی

گزارش پروژه کارشناسی  
مهندسی برق

ایستگاه هواشناسی دیجیتال

دانشجویان

مهدی جمشیدی

محمد ابراهیم ابراهیم طوسی

استاد راهنما

دکتر بهزاد بقراطی

# فهرست مطالب

۱	مقدمه	۱
۱	اجزای سیستم	۲
۲	۱.۲ میکروکنترلر	۲
۲	۲.۲ ارتباط بی سیم	۲
۲	۳.۲ سنسورها	۲
۲	۱.۳.۲ فشارسنج	۲
۳	۲.۳.۲ شدت نور	۳
۳	۳.۳.۲ قطب نما	۳
۳	۴.۳.۲ دما و رطوبت هوا	۳
۳	۵.۳.۲ شدت و جهت باد	۳
۶	۳ پروتکل های ارتباطی	۳
۶	۱.۳ پروتکل SPI	۶
۷	۲.۳ پروتکل I <sup>2</sup> C	۷
۸	۳.۳ پروتکل USB	۸
۹	۴ پیاده سازی سیستم	۹
۱۱	۵ طراحی برد مدار چاپی	۱۱
۱۲	۶ نتایج	۱۲
۱۳	۷ نتیجه گیری	۱۳

## ۱ مقدمه

ایستگاه هواشناسی، مرکزی مجهز به تجهیزات و ابزارهایی برای اندازه‌گیری‌های جوی است که به ارائه اطلاعات برای پیش‌بینی و مطالعه آب‌وهوا می‌پردازد. اندازه‌گیری انجام‌شده معمولاً شامل دما، فشار هوا، رطوبت، سرعت باد، جهت باد و مقدار بارش است. مشاهدات دستی حداقل یک بار در روز انجام می‌شود، درحالی‌که اندازه‌گیری خودکار حداقل یک بار در ساعت انجام می‌پذیرد. ایستگاه‌های هواشناسی معمولی مجهز به ابزارهای زیر هستند [۱]:

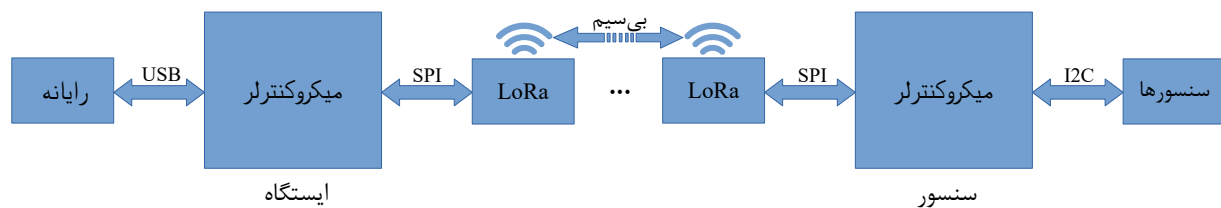
- رطوبت‌سنج برای اندازه‌گیری رطوبت
- فشارسنج برای اندازه‌گیری فشار جو
- دماسنج برای اندازه‌گیری دمای هوا
- پیرانومتر برای اندازه‌گیری تشعشعات خورشیدی
- باران‌سنج برای اندازه‌گیری میزان بارش باران در طی یک دوره زمانی مشخص
- تجهیزاتی نظیر بادسنج، پرچم باد یا جوراب باد برای اندازه‌گیری سرعت و جهت باد

ایستگاه‌های پیشرفته‌تر همچنین ممکن است شاخص فرابنفش، رطوبت برگ، رطوبت خاک، دمای خاک، دمای آب در حوضچه‌ها، دریاچه‌ها، نهرها یا رودخانه‌ها و گاهی داده‌های دیگر را اندازه‌گیری کنند. به‌جز دستگاه‌هایی که نیازمند تماس مستقیم با عناصر مورد اندازه‌گیری هستند (نظیر بادسنج)، دیگر سنسورها و دستگاه‌ها باید در محفظه‌ای به‌دور از تابش مستقیم خورشید و وزش باد قرار بگیرند.

ایستگاه‌های هواشناسی سینوپتیک (Synoptic) ۲۴ ساعته به‌صورت خودکار هر سه ساعت به سه ساعت پارامترهای جوی را پس از اندازه‌گیری و جمع‌آوری از طریق شبکه‌های مخابراتی منتقل می‌کنند. به‌طور مشابه ایستگاه‌هایی با نام متار (Metar) این کار را هر یک ساعت انجام می‌دهند. وظیفه این ایستگاه‌ها جمع‌آوری اطلاعات جوی از محدوده‌هایی وسیع و مخابره به ایستگاه‌های اصلی به‌منظور اطلاع از وضعیت حال و گذشته و پیش‌بینی شرایط آب و هوایی مناطق در آینده است. هدف این پروژه پیاده‌سازی نوعی ایستگاه هواشناسی سینوپتیک است که با تجهیزات ارزان و کم‌مصرف دیجیتال پارامترهای جوی لازم را جمع‌آوری و به‌صورت بی‌سیم به ایستگاهی جهت ثبت و نمایش مخابره می‌کند. در این پروژه از میکروکنترلر ARM (Microcontroller) سری STM32F10X به‌عنوان هسته اصلی پردازش در هر دو سمت سنسور و ایستگاه و از ماژول لورا (LoRa) با چیپ SX1278 به‌منظور برقراری ارتباط بی‌سیم استفاده شده است.

## ۲ اجزای سیستم

این سیستم به دو دستگاه اصلی تقسیم می‌شود، یک دستگاه جهت جمع‌آوری اطلاعات جوی بر روی یک میله در ارتفاع ۱۰ متری سطح زمین قرار می‌گیرد و اطلاعات جوی نظیر دما، رطوبت، فشار، شدت نور، سرعت و جهت باد را از سنسورهای مربوطه جمع‌آوری کرده و به‌صورت بی‌سیم به دستگاه دیگر، که در ایستگاه اصلی قرار دارد، مخابره می‌کند؛ سپس اطلاعات دریافت شده در سمت دستگاه دوم جهت ثبت و ذخیره به رایانه منتقل می‌شود. در اینجا به دستگاه اول که وظیفه جمع‌آوری اطلاعات جوی را دارد سنسور و دستگاه دوم که وظیفه دریافت اطلاعات مخابره شده و انتقال به رایانه را دارد ایستگاه می‌گوییم. بلوک دیاگرام کلی این سیستم و نحوه ارتباط بخش‌های مختلف با یکدیگر در شکل ۱ آمده است.



شکل ۱: بلوک دیاگرام اجزای سیستم و نحوه ارتباط اجزای مختلف با یکدیگر.

## ۱.۲ میکروکنترلر

هسته اصلی پردازش در هر دو سمت ایستگاه و سنسور میکروکنترلر STM32f103CBT6 انتخاب شده است که با توجه به موجود بودن در بازار ایران و دارا بودن ۲ عدد  $I^2C$ <sup>۱</sup>، ۲ عدد SPI<sup>۲</sup>، اینترفیس USB<sup>۳</sup> و ۳ عدد تایمر ۱۶ بیتی نیاز به حداقل ۱ عدد  $I^2C$  (در سمت سنسور)، ۱ عدد SPI (در هر دو سمت)، اینترفیس USB (در سمت ایستگاه) و ۱ عدد تایمر (در سمت سنسور) را برآورده می‌کند. همچنین حالت Sleep و واحد RTC موجود در این میکروکنترلرها به کاهش مصرف انرژی در وقفه‌های سه ساعته کمک می‌کند؛ به‌طوری‌که استفاده از سیستم باتری و پنل خورشیدی را ممکن می‌سازد.

## ۲.۲ ارتباط بی‌سیم

به‌طورکلی در این سیستم مصرف پایین انرژی به دلیل استفاده از سیستم باطری و پنل خورشیدی بسیار اهمیت دارد. استفاده از شبکه تلفن همراه<sup>۴</sup> به‌عنوان راه‌حلی ابتدایی برای ارتباط بی‌سیم، علاوه بر نداشتن صرفه اقتصادی مصرف انرژی زیادی را به سیستم تحمیل می‌کند. همچنین تضمینی برای وجود پوشش شبکه تلفن همراه در مناطقی که قرار است داده‌های جوی از آن جمع‌آوری شود وجود ندارد. از این‌رو بهترین رویکرد استفاده از گیرنده و فرستنده‌های رادیویی در باندهای فرکانسی بدون نیاز به مجوز (ISM) است. از میان گزینه‌های موجود ماژول‌های لورا<sup>۵</sup> به لطف مدولاسیون CSS<sup>۷</sup> که از آن بهره می‌برند دارای مصرف توان پایین، ناحیه پوشش وسیع و نفوذپذیری مناسبی هستند که کاملاً با نیازهای ما سازگار است. ماژول LoRa Ra-02 با تراشه Sx1278 دارای رنج فرکانسی ۴۱۰ تا ۵۲۵ مگاهرتز، و توان انتقالی ماکسیموم ۱۸dBm است و از مدولاسیون‌های LoRa، FSK<sup>۸</sup> و OOK<sup>۹</sup> پشتیبانی می‌کند. برای ارتباط بی‌سیم در این پروژه از این ماژول استفاده شده است.

## ۳.۲ سنسورها

به‌منظور استخراج داده‌های جوی نظیر دمای هوا، رطوبت، فشار، شدت نور و... از سنسورهای دیجیتال استفاده می‌شود. این سنسورها علاوه بر کم‌مصرف بودن دارای دقت بالا و تأخیر پایینی در اندازه‌گیری پارامترهای موردنظر هستند. با دارا بودن این ویژگی‌ها این سنسورها کاملاً با سیستم تغذیه باتری و سلول خورشیدی سازگار هستند.

## ۱.۳.۲ فشارسنج

تغییرات فشار جوی یکی از عناصر مهم در پیش‌بینی وضعیت آب‌وهوا است. فشارسنج‌های جیوه‌ای از اواخر قرن ۱۶ جهت پیش‌بینی وضعیت آب‌وهوا مورد استفاده قرار می‌گرفت. به‌طورکلی تغییر فشار هوا رو به بالا نشان‌دهنده آسمان آفتابی، گرم و صاف

<sup>۱</sup>Inter-Integrated Circuit

<sup>۲</sup>Serial Peripheral Interface

<sup>۳</sup>Interface

<sup>۴</sup>Universal Serial Bus

<sup>۵</sup>The Global System for Mobile Communications (GSM)

<sup>۶</sup>LoRa (Long Range)

<sup>۷</sup>Chirp Spread Spectrum

<sup>۸</sup>Frequency Shift Keying

<sup>۹</sup>On Off Keying

و تغییر فشار هوا رو به پایین نشان دهنده بارش باران، طوفان و آسمانی مملو از ابرهای باران‌زا است. علاوه بر این فشار هوا یکی از عوامل مؤثر در سنجش سرعت باد نیز به شمار می‌آید.

سنسور استفاده شده برای این منظور ماژول سنسور BMP180 است که با مصرف جریان تنها در حد چند میکرو آمپر دقتی معادل  $0.3$  هکتوپاسکال<sup>۱</sup> دارد و توانایی اندازه‌گیری فشار هوا در بازه  $300$  تا  $1100$  هکتوپاسکال را دارا است. نحوه ارتباط با این ماژول از طریق رابط  $I^2C$  است.

### ۲.۳.۲ شدت نور

شدت نور خورشید یکی از پارامترهای اصلی سنجش وضعیت آب‌وهوا است. از این سنسور جهت تشخیص ابری یا آفتابی بودن هوا می‌توان استفاده کرد. همچنین به دلیل اهمیت موضوع سلامت پوست، معمولاً در کنار این سنسور از سنسور سنجش شدت UV به منظور اطلاع‌رسانی شدت UV نیز استفاده می‌شود.

جهت سنجش شدت نور از ماژول سنسور MAX44009 استفاده شده است که با  $0.65$  میکرو آمپر مصرف جریان در هنگام کارکرد شدت نور در بازه  $0.45$  لوکس تا  $188$  هزار لوکس را اندازه‌گیری می‌کند. همچنین اینترفیس ارتباطی این ماژول رابط سریالی  $I^2C$  می‌باشد.

### ۳.۳.۲ قطب‌نما

از آنجایی که این دستگاه در سمت سنسور معمولاً در ارتفاع  $10$  متری زمین روی یک میله نصب می‌شود، قرار دادن دستگاه در جهت جغرافیایی خاص، به جهت سنجش جهت باد، ممکن است دشوار باشد (یا حتی خیلی دقیق نباشد). با وجود سنسور قطب‌نما در این دستگاه (برخلاف برخی دستگاه‌های مشابه) دیگر نیازی به نصب دستگاه در جهت جغرافیایی خاص نخواهد بود. سنسور استفاده شده برای این منظور سنسور QMC5883L است. که با ماکسیموم  $100$  میکرو آمپر مصرفی می‌توان به دقت یک تا دو درجه در جهت‌یابی رسید. همچنین طریقه ارتباط این سنسور با میکروکنترلر از طریق رابط  $I^2C$  است.

### ۴.۳.۲ دما و رطوبت هوا

در کنار وضعیت آسمان (ابری، آفتابی، بارانی و... بودن) معمولاً به طور مستقیم پارامتر دمای هوا نیز در اطلاع‌رسانی وضعیت و پیش‌بینی آب‌وهوا نقش ایفا می‌کند. در کنار این موارد رطوبت هوا نیز، علاوه بر نقشی که در پیش‌بینی دارد، معمولاً به طور مستقیم به سمع و نظر مخاطبین می‌رسد. علاوه بر این رطوبت نسبی هوا در کنار دمای هوا نقش مهمی در رسیدن به آسایش حرارتی در بدن انسان (و موجودات) دارد. به طوری کلی در دمای هوای بالاتر به رطوبت نسبی کمتری نسبت به دمای هوای پایین‌تر برای رسیدن به سطح آسایش حرارتی نیاز است [۲].

ماژول سنسور AHT10 دما و رطوبت نسبی هوا را با دقت  $0.1$  درجه سلسیوس<sup>۲</sup> و  $0.24$  درصد با تنها  $3.3$  میکرو وات مصرف توان اندازه‌گیری می‌کند. همچنین این ماژول در رطوبت  $100$  تا  $40$  درصد و دمای  $40$  تا  $100$  درجه‌ی سلسیوس قابل استفاده است. خروجی این ماژول نیز سیگنال دیجیتال ارتباطی  $I^2C$  است.

### ۵.۳.۲ شدت و جهت باد

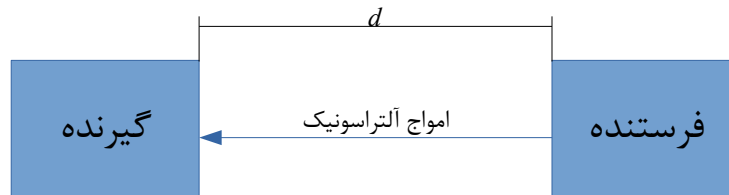
روش‌های مختلفی برای سنجش شدت باد وجود دارد، عمدتاً در این کاربرد دو روش سنجش مکانیکی و آلتراسونیک<sup>۳</sup> مورد استفاده قرار می‌گیرد. در سنجش شدت و جهت باد در روش مکانیکی از دو ابزار که به صورت مستقل کار می‌کنند (در برخی موارد این دو ابزار در قالب یک دستگاه در کنار هم قرار می‌گیرند) استفاده می‌شود، به طوری که یک ابزار برای سنجش شدت و ابزاری دیگر برای تعیین جهت، مورد استفاده قرار می‌گیرد. هر دو دستگاه دارای قطعات متحرک‌اند و یکی با داشتن پره‌هایی شبیه به دم‌هلی‌کوپتر با وزش باد در جهت وزش قرار می‌گیرد و دیگری دارای پره‌هایی است که با وزش باد پره‌ها همانند پره‌های توربین به حرکت درمی‌آید که با توجه به سرعت چرخش پره‌ها سرعت باد قابل اندازه‌گیری است. در اندازه‌گیری‌های این دستگاه‌ها

<sup>1</sup>Hectopascal (hPa)

<sup>2</sup>Celsius

<sup>3</sup>Ultrasonic

محدودیت‌هایی وجود دارد و اغلب این نوع ابزارها در وزش باد ملایم عملکرد صحیحی از خود نشان نمی‌دهند. همچنین در اندازه‌گیری زاویه وزش ممکن است محدود به اندازه‌گیری زوایای خاصی باشند. در روش اندازه‌گیری شدت و جهت باد با آلتراسونیک اندازه‌گیری‌ها می‌تواند در قالب تنها یک دستگاه، بدون قطعات متحرک و با دقتی بالاتر انجام پذیرد. در این روش ۲ فرستنده و گیرنده آلتراسونیک همان‌طور که در شکل ۲ نشان داده شده است روبروی یکدیگر در فاصله مشخص  $d$  قرار داده می‌شوند.



شکل ۲: نحوه قرارگیری فرستنده و گیرنده آلتراسونیک.

فرستنده امواج صوتی با فرکانس ۴۰ کیلوهرتز (که برای گوش انسان قابل شنیدن نیست) تولید می‌کند. فاصله زمانی بین ارسال امواج صوتی از فرستنده و دریافت این امواج در گیرنده اندازه‌گیری می‌شود. با توجه به رابطه ۱، سرعت  $v$  با داشتن فاصله  $d$  و زمان تأخیر بین ارسال موج صوتی در فرستنده و دریافت آن در گیرنده  $t$ ، قابل اندازه‌گیری است.

$$v = \frac{d}{t} \quad (۱)$$

سرعت  $v$  به‌دست آمده از این رابطه مطابق رابطه ۲ متشکل از سرعت صوت  $v_s$  و سرعت باد  $v_{wx}$  است [۳].

$$v = v_s + v_{wx} \quad (۲)$$

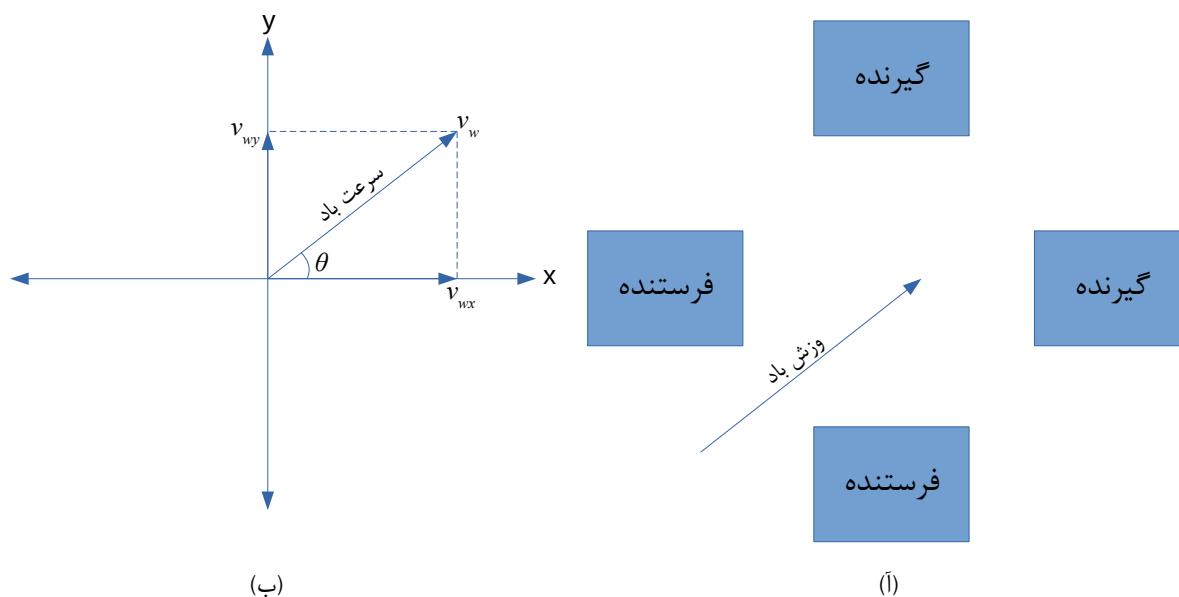
در صورتی که وزش باد در جهت موافق حرکت امواج صوتی باشد زمان تأخیر در دریافت امواج نسبت به حالی که باد نوزد کمتر شده و در نتیجه سرعت  $v$  نسبت به حالتی که باد نوزد افزایش می‌یابد (یعنی علامت  $v_{wx}$  مثبت بوده و  $v = v_s + v_{wx}$ ). در صورتی که وزش باد در خلاف جهت حرکت امواج صوتی باشد زمان تأخیر در دریافت امواج نسبت به حالتی که باد نوزد بیشتر شده و در نتیجه سرعت  $v$  کاهش می‌یابد (یعنی علامت  $v_{wx}$  منفی بوده و  $v = v_s - v_{wx}$ ). با داشتن سرعت صوت  $v_s$ ، فاصله  $d$  و محاسبه زمان  $t$  می‌توان با توجه به معادلات ۱ و ۲ سرعت باد  $v_{wx}$  و جهت باد (علامت سرعت  $v_{wx}$ ) روی یک محور مطابق رابطه ۳ به‌دست آورد.

$$v_{wx} = \frac{d}{t} - v_s \quad (۳)$$

به‌منظور سنجش شدت و جهت باد در دو بعد می‌توان دو فرستنده و گیرنده دیگر بر روی محوری عمود بر محور متصل‌کننده فرستنده و گیرنده فعلی قرارداد و با محاسبه دو بردار سرعت، بردار سرعت برآیند را به‌دست آورد. اگر نحوه قرارگیری فرستنده و گیرنده‌ها مطابق شکل ۳ باشد در این صورت صفحه مختصات متناظر با آن مطابق شکل ۳ خواهد بود. اندازه  $v_w$  و زاویه  $\theta$  بردار سرعت باد از طریق روابط ۴ به‌دست می‌آیند.

$$v_w = \sqrt{v_{wx}^2 + v_{wy}^2}$$

$$\theta = \tan^{-1} \left( \frac{v_{wy}}{v_{wx}} \right) \quad (۴)$$



شکل ۳: نحوه قرارگیری فرستنده و گیرنده آلتراسونیک دو محوره و نمودار متناظر با آن‌ها.

جدول ۱: ضرایب محاسبه سرعت صوت (فرمول ۵) [۴].

ضرایب	
331.5024	$a_0$
0.603055	$a_1$
-0.000528	$a_2$
51.471935	$a_3$
0.1495874	$a_4$
-0.000782	$a_5$
$-1.82 \times 10^{-7}$	$a_6$
$3.73 \times 10^{-8}$	$a_7$
$-2.93 \times 10^{-10}$	$a_8$
-85.20931	$a_9$
-0.228525	$a_{10}$
$5.91 \times 10^{-5}$	$a_{11}$
-2.835149	$a_{12}$
$-2.15 \times 10^{-13}$	$a_{13}$
29.179762	$a_{14}$
0.000486	$a_{15}$

سرعت صوت  $v_s$  به عنوان تابعی از دما، فشار و کسر مولی رطوبت و کربن دی اکسید، با استفاده از رابطه ۵ قابل محاسبه است [۴]. ثوابت  $a_1$  تا  $a_{15}$  در جدول ۱ آمده‌اند.

$$\begin{aligned}
 v_s(\tau, p, x_w, x_c) = & a_0 + a_1\tau + a_2\tau^2 + (a_3 + a_4\tau + a_5\tau^2)x_w \\
 & + (a_6 + a_7\tau + a_8\tau^2)p + (a_9 + a_{10}\tau + a_{11}\tau^2)x_c \quad (5) \\
 & + a_{12}x_w^2 + a_{13}p^2 + a_{14}x_c^2 + a_{15}x_wpx_c
 \end{aligned}$$

که  $\tau$  دمای هوا (برحسب درجه سلسیوس)،  $p$  فشار هوا (برحسب پاسکال)،  $x_w$  کسر مولی بخار آب در هوا و  $x_c$  کسر مولی کربن دی اکسید در هوا است.  $x_c$  را ثابت و برابر  $400 \times 10^{-6}$  در نظر می‌گیریم. کسر مولی بخار آب در هوا  $x_w$  از رابطه ۶

به دست می آید [۵].

$$x_w = \frac{hf p_{sv}}{100p} \quad (۶)$$

که  $h$  درصد رطوبت هوا،  $p_{sv}$  فشار اشباع بخار آب در هوا و  $f$  ضریب تقویت است و از طریق روابط ۷ و ۸ محاسبه می شوند [۶].

$$f = 1.00062 + 3.14 \times 10^{-8}p + 5.6 \times 10^{-7}\tau^2 \quad (۷)$$

$$p_{sv} = \exp \left( 1.2811805 \times 10^{-5}T^2 - 1.9509874 \times 10^{-2}T + 34.04926034 - 6.3536311 \times 10^3/T \right) \quad (۸)$$

که در این روابط  $T$  دمای محیط برحسب کلوین<sup>۱</sup> است، یعنی:

$$T = \tau + 273.15 \quad (۹)$$

### ۳ پروتکل های ارتباطی

قطعات الکترونیک نیز همانند انسان ها برای ارتباط با یکدیگر باید از یک زبان واحد قابل فهم برای هر دو طرف استفاده کنند که به این زبان ها پروتکل های ارتباطی گفته می شود. در این پروژه نیز همانند اکثر پروژه های الکترونیکی از تعدادی از این پروتکل ها برای برقراری ارتباط بین قطعات الکترونیکی مختلف (سنسورها، فرستنده-گیرنده های رادیویی و میکروکنترلر) استفاده شده است. در زیر اطلاعات کلی هر یک از پروتکل های ارتباطی استفاده شده در این پروژه آمده است.

#### ۱.۳ پروتکل SPI

این پروتکل یک رابط ارتباط سریالی سنکرون<sup>۲</sup> (همزمان) چهار سیم است که برای ارتباط بین تنها یک Master و چندین Slave می تواند مورد استفاده قرار گیرد. خطوط ارتباطی بین Master و Slave شامل خط سیگنال کلاک (SCLK<sup>۳</sup>)، خط ارسال داده از Master به Slave (MOSI<sup>۴</sup>)، خط ارسال داده از Slave به Master (MISO<sup>۵</sup>) و خط انتخاب Slave (SS<sup>۶</sup> یا CS<sup>۷</sup>). در حالت Full Duplex به ازای هر Slave معمولاً نیاز به یک پین انتخاب گر (SS یا CS) مجزا در سمت Master خواهد بود. نحوه اتصال دستگاه های Slave به Master در شکل ۴ آمده است.

سیگنال کلاک همواره توسط Master تولید و به ازای هر سیگنال کلاک یک بیت داده منتقل می شود. از این رو ارسال داده از Slave به Master به طور تصادفی و در هر لحظه ممکن نیست و تنها Slave می تواند در لحظاتی که Master درخواست می کند و سیگنال کلاک را تولید می کند داده را بر روی خط MISO ارسال کند. البته به دلیل وجود خطوط مجزای ارسال و دریافت داده، ارسال و دریافت همزمان داده نیز ممکن است. همچنین در این پروتکل دستگاه های Slave به تنهایی نمی توانند با یکدیگر ارتباط برقرار کنند.

<sup>۱</sup>Kelvin

<sup>۲</sup>synchronous

<sup>۳</sup>Serial Clock

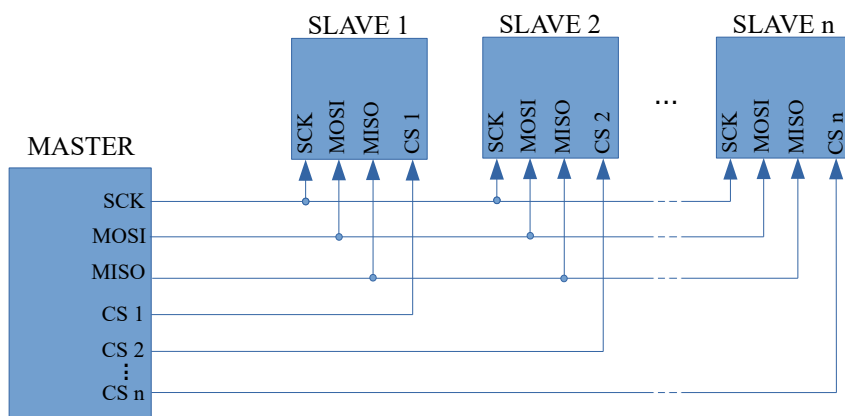
<sup>۴</sup>Master Out Slave In

<sup>۵</sup>Master In Slave Out

<sup>۶</sup>Slave Select

<sup>۷</sup>Chip Select



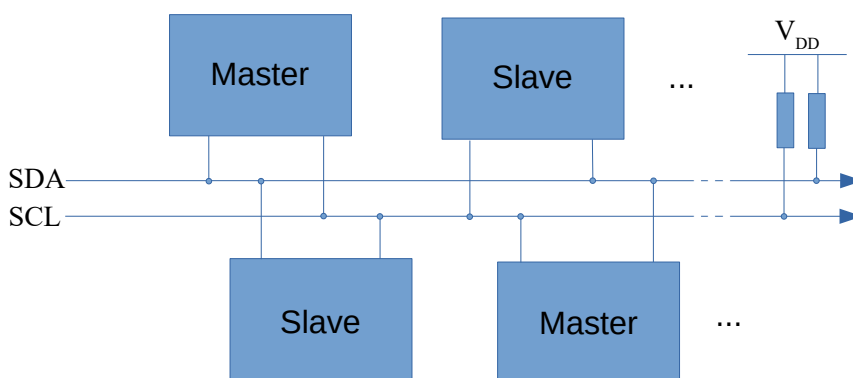


شکل ۴: نحوه اتصال Slave ها به Master در حالت Full Duplex

به جهت ارسال داده، Master از طریق قراردادن خط SS (یا CS) در حالت low انتخاب می‌کند که با کدام Slave می‌خواهد ارتباط برقرار کند. وضعیت خط را تا پایان فرآیند ارسال و دریافت داده در همین حالت (low) نگه‌می‌دارد. در همین حال سیگنال کلاک را روی خط SCLK متناسب با طول داده‌ای قرار می‌دهد (ماکسیموم فرکانس کلاک بستگی به ماکسیموم مقدار قابل‌شناسایی توسط Slave دارد) و داده‌ای را نیز متناسب با کلاک روی خط MOSI قرار می‌دهد (قرار دادن داده روی لبه بالارونده یا پایین‌رونده و همچنین ارسال از بیت MSB یا LSB بستگی به Slave دارد)؛ اگر قرار باشد Slave دیتایی در پاسخ به دیتای دریافتی ارسال کند (این امر باید از قبل مشخص باشد چراکه همان‌طور که گفته شد مسئول تولید کلاک فقط Master است) باید Master کلاک‌هایی متناسب با دیتای مورد انتظار برای دریافت را روی خط SCLK تولید کند و دیتای مربوطه را از روی خط MISO بخواند.

## ۲.۳ پروتکل I<sup>2</sup>C

پروتکل I<sup>2</sup>C رابط سریالی سنکرون دو سیم است که علاوه بر پشتیبانی از چندین Slave قابلیت پشتیبانی از چند Master را نیز دارا می‌باشد (البته Masterها قادر به برقراری ارتباط با یکدیگر نیستند و از خطوط باس به‌طور همزمان نمی‌توانند استفاده کنند). در این پروتکل برای ارتباط از تنها دو خط سیگنال کلاک (SCL<sup>۱</sup>) و سیگنال دیتا (SDA<sup>۲</sup>) استفاده می‌شود. نحوه اتصال دستگاه‌ها در این پروتکل در شکل ۵ آمده است.



شکل ۵: نحوه اتصال در پروتکل I<sup>2</sup>C

در این پروتکل نیز همانند پروتکل SPI سیگنال کلاک توسط Master کنترل می‌شود. اعلام شروع ارسال داده با بالا نگه‌داشتن خط SCL و پایین کشیدن خط SDA انجام می‌شود. اگر دو Master به‌طور همزمان قصد تبادل داده با Slaveها

<sup>۱</sup>Serial Clock Line

<sup>۲</sup>Serial Data Line

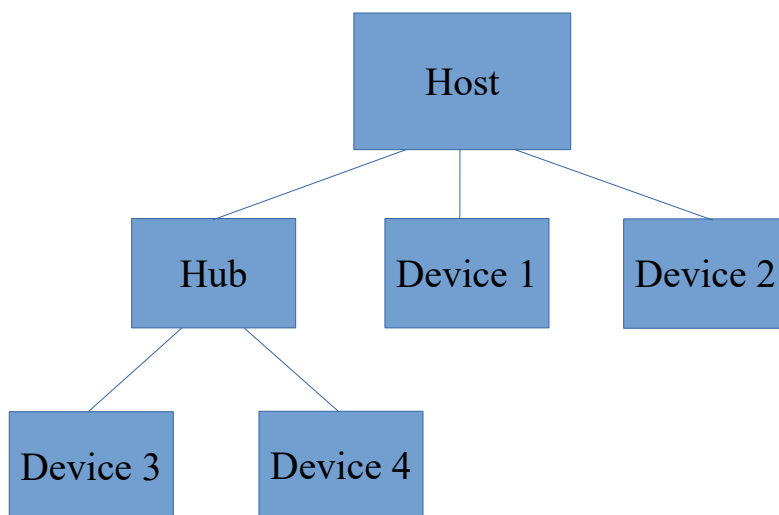
را داشته باشند هرکدام که زودتر SDA را پایین بکشید اجازه استفاده از خط را دارد و Master دیگر باید تا پایان تبادلات Master اول صبر کند.

برای انتقال داده پس از اعلام شروع ارسال توسط Master، ۷ بیت آدرس Slave که قرار است با آن ارتباط برقرار شود ارسال می‌شود و پس از آن یک بیت read/write ارسال می‌شود تا Slave از قصد Master برای خواندن (سطح منطقی ۱) یا نوشتن (سطح منطقی ۰) مطلع شود (امکان ارتباط با Slave با آدرس‌های ۱۰ بیتی نیز وجود دارد که نحوه ارسال آن کمی متفاوت است ولی فرآیندهای دیگر در دریافت و ارسال داده‌ها یکسان است). در تمام طول ارسال و دریافت داده سیگنال کلاک نیز به‌طور منظم روی خط SCL تولید می‌شود. بعد از ارسال آدرس توسط Master، Slave ها آدرس‌های خود را با آدرس خود مقایسه کرده و در صورتی که با آن مطابقت داشت بیت تصدیق (ACK) را با پایین کشیدن SDA تا قبل از کلاک نهم ارسال می‌کنند. اگر بیت تصدیق در این زمان ارسال نشود و SDA در سطح high بماند ارسال داده متوقف می‌شود چراکه عدم دریافت بیت تصدیق نشان‌دهنده عدم وجود Slave موردنظر روی خط و یا عدم توانایی Slave در رمزگشایی داده ارسالی است.

پس از ارسال آدرس و دریافت تصدیق از سمت Slave با توجه به بیت read/write ارسالی، داده توسط Slave (در حالت خواندن) و یا Master (در حالت نوشتن) روی خط SDA قرار داده می‌شود. بعد از ارسال هر ۸ بیت داده نیز لازم است بیت تصدیق دریافت داده‌ها (ACK) از طرف دریافت‌کننده داده‌ها ارسال شود. بعد از ارسال یا دریافت تمام داده‌ها باید وضعیت توقف اعلام شود تا دیگر Master ها بتوانند پس از آن از خط استفاده کنند. اعلام وضعیت توقف با یک تغییر وضعیت SDA از سطح منطقی ۰ به ۱ و پس از آن یک تغییر وضعیت از سطح منطقی ۰ به ۱ روی خط SCL انجام می‌شود.

### ۳.۳ پروتکل USB

پروتکل USB یک پروتکل ارتباطی سریال آسنکرون<sup>۱</sup> (ناهمزمان) دو سیم است که ارتباطی بین چندین دستگاه جانبی یا Device و دستگاه اصلی یا Host را فراهم می‌کند. USB توسط یک گروه متشکل از شرکت‌های فعال در زمینه رایانه و الکترونیک ایجاد شد که هدف ساخت پروتکل سریال همه‌منظوره برای اتصال لوازم جانبی به رایانه را داشتند. به دلیل همه‌منظوره بودن USB استفاده از این پروتکل دارای جزئیات بسیار زیادی است و برخلاف دو پروتکل قبلی راه‌اندازی این پروتکل ممکن است زمان‌بر باشد. در این پروژه از این پروتکل برای ارتباط دستگاه سمت ایستگاه با رایانه و همچنین تأمین تغذیه آن استفاده می‌شود. نحوه اتصال دستگاه‌ها به Host در شکل ۶ آمده است.



شکل ۶: نحوه اتصال دستگاه‌های جانبی به دستگاه اصلی در پروتکل USB

به‌طور کلی برای ارتباط دستگاه‌های جانبی با دستگاه اصلی، دستگاه جانبی نیازمند دارا بودن Device Class مشخص و شناخته‌شده برای دستگاه اصلی است. پیاده‌سازی دیوایس کلاس‌های اختصاصی به خاطر پیچیدگی‌هایی که این پروتکل دارد امری بسیار زمان‌بر خواهد بود به همین دلیل معمولاً استفاده از دیوایس کلاس‌های آماده (و لایبرری‌های متناظر با آن) برای

<sup>۱</sup> Asynchronous

ساخت دستگاه‌های جدید مناسب‌ترین روش ممکن است (این کار همچنین امر دریافت گواهی‌های سخت‌افزاری و نرم‌افزاری USB را نیز تسهیل می‌کند).

در این پروتکل ۴ نوع انتقال داده وجود دارد. انتقال Control که تنظیمات و مشخصات دستگاه و دستورات را منتقل می‌کند. انتقال Isochronous که برای انتقال داده‌هایی که زمان‌بندی در آنها اهمیت دارد نظیر صدای میکروفون و تصویر وب‌کم مورد استفاده قرار می‌گیرد. انتقال Bulk که برای ارسال داده‌های حجیم‌تر به صورت یکجا مورد استفاده قرار می‌گیرد مانند انتقال تصویر برای پرینت و یا اسکن و یا انتقال داده‌های ذخیره‌شده روی یک فلش مموری. انتقال Interrupt که داده‌هایی با حجم بسیار کم و اهمیت زیاد را جابجا می‌کند که معمولاً توسط موس، کیبورد و جواستیک (Joystick) و عموماً در کلاس HID<sup>۱</sup> مورد استفاده قرار می‌گیرد.

در این پروتکل لازم است دستگاه اصلی از تمامی جزئیات کارکرد و مشخصات دستگاه جانبی مطلع شود. مشخصات کلی دستگاه مثل ورژن USB مورد استفاده، شناسه و نام سازنده، شناسه و نام دستگاه و مشخصات کلاس دستگاه در بخشی با عنوان Device Descriptor با فرمتی خاص و مشخص به اطلاع رایانه می‌رسد. بخش دیگری با عنوان Config-ration Descriptors بیان‌کننده نحوه تغذیه و ماکسیموم توان مورد نیاز دستگاه متصل به USB است. بخش Interface Descriptors نیز بیان‌کننده ویژگی‌های کلاس دستگاه است و شامل چندین Endpoint Descriptors می‌شود که برای انجام آن ویژگی‌ها مورد نیاز هستند. برای هر Endpoint در سمت دستگاه جانبی از نظر سخت‌افزاری معمولاً یک رجیستر یا مموری تعریف می‌شود که دیتا با توجه به مشخصات هر Endpoint از آن خوانده می‌شود یا در آن نوشته می‌شود هر Endpoint فقط مسئول یکی از اعمال خوانده شدن یا نوشته شدن است و برای هر دو عمل خواندن و نوشتن به دو Endpoint نیاز است. ماکسیموم می‌توان ۱۶ Endpoint تعریف کرد، Endpoint صفر رزرو و برای مشخصات کنترلی استفاده می‌شود دیگر Endpoint ها را می‌توان با مشخصات مورد نیاز تعریف کرد.

به‌طور مثال در این پروژه از کلاس CDC<sup>۲</sup> استفاده شده است (که در کارت‌های شبکه و مودم‌ها نیز مورد استفاده قرار می‌گیرد). برای تبادل داده با رایانه در این کلاس از ارسال نوع Bulk استفاده می‌شود. پس اینترفیس از نوع CDC باید یک Endpoint با دیتاتایپ Bulk به عنوان ورودی و یک Endpoint دیگر با دیتاتایپ Bulk به عنوان خروجی داشته باشد. آدرس Endpoint ورودی 0x01 و Endpoint خروجی 0x81 تنظیم شده‌اند. همچنین چون قصد استفاده از USB در حالت Full Speed را داریم ماکسیموم سایز بسته ارسالی نیز ۶۴ بایت تنظیم شده است.

## ۴ پیاده‌سازی سیستم

عملکرد کلی سیستم جمع‌آوری داده‌ها در سمت سنسور، ارسال اطلاعات از طریق لورا به سمت ایستگاه و نمایش اطلاعات دریافت شده در سمت ایستگاه بر روی رایانه است. به‌طور کلی این سیستم به دو بخش سنسور و ایستگاه تقسیم می‌شود که بخش ایستگاه خود به دو بخش دستگاه گیرنده و برنامه دسکتاپ (Desktop) قابل تقسیم است. در سمت سنسور اجرای فرآیندها به طریق زیر است:

- بعد از روشن شدن دستگاه و فعال‌سازی بخش‌های مورد نیاز (peripherals)، میکروکنترلر از طریق I<sup>2</sup>C با سنسور BMP180 ارتباط برقرار می‌کند و ضرایب کالیبراسیو را از سنسور BMP180 می‌خواند این ضرایب برای محاسبه دما و فشار مورد استفاده قرار می‌گیرند [۷].
- میکروکنترلر با برقراری ارتباط از طریق I<sup>2</sup>C با سنسور MAX44009 مقدار رجیستر تنظیمات این سنسور را 0x00 تنظیم می‌کند. در این حالت سنسور در پایین‌ترین سطح مصرف توان خود قرار می‌گیرد و هر ۸۰۰ میلی‌ثانیه یکبار میزان شدت نور را اندازه‌گیری می‌کند [۸].
- با برقراری ارتباطی از طریق I<sup>2</sup>C با سنسور HMC5883L و تنظیم رجیستر تنظیمات، سنسور در حالت آماده‌به‌کار و نرخ نمونه‌برداری ۵۰ هرتز قرار می‌گیرد [۹].

<sup>۱</sup>Human interface device

<sup>۲</sup>Communications Device Class

- رجیسترهای تنظیمات ماژول LoRa با برقراری ارتباط از طریق SPI تنظیم شده و این ماژول در حالت آماده به کار قرار می گیرد. فرکانس این ماژول روی ۴۳۳ مگاهرتز، توان آن روی ۲۰ dBm، ضریب بخش آن روی ۱۰ و پهنای باند آن روی ۳۱/۲ کیلوهرتز تنظیم می گردد (به منظور دریافت اطلاعات ارسالی در سمت ایستگاه نیز دقیقاً همین تنظیمات فرکانس، پهنای باند و ضریب بخش باید اعمال شوند) [۱۰].
  - برنامه وارد حلقه اصلی کار خود شده و دما و فشار را با استفاده از سنسور BMP180 اندازه گیری می کند.
  - پس از اندازه گیری شدت نور با استفاده از سنسور MAX44009 [۸] و اندازه گیری رطوبت هوا به وسیله سنسور AHT10 [۱۱]، جهت جغرافیایی توسط سنسور QMC5883L [۹] به دست می آید.
  - سرعت باد روی دو محور x و y با استفاده از سنسور HCSR05 و با توجه به رابطه ی ۳ محاسبه می شود. سپس زاویه و شدت باد با توجه به سرعت باد روی هر دو محور با توجه به رابطه ۴ به دست می آید.
  - اطلاعات جمع آوری و محاسبه شده از طریق ماژول لورا برای گیرنده سمت ایستگاه ارسال می شود.
  - میکروکنترلر و سنسورها در حالت توقف<sup>۱</sup> قرار داده می شوند و پس از سه ساعت با رخ دادن آلارم<sup>۲</sup> میکروکنترلر از حالت توقف خارج شده و فرآیند دریافت و ارسال داده ها را تکرار می کند.
  - پس از هر بار خارج شدن از حالت توقف، آلارم بعدی برای سه ساعت بعد تنظیم می شود.
- در سمت ایستگاه نیز فرآیند زیر اجرا می شود:
- با اتصال دستگاه از طریق کابل USB به رایانه میکروکنترلر پس از فعال سازی بخش های مورد نیاز، از طریق SPI با ماژول لورا ارتباط برقرار کرده و رجیسترهای تنظیمات را با اطلاعات مشابه با سمت سنسور پر می کند و ماژول لورا را در حالت دریافت اطلاعات بدون توقف<sup>۳</sup> قرار می هد [۱۰].
  - میکرو به حلقه اصلی کار خود وارد شده و پس از چک کردن وجود دیتای دریافتی در ماژول لورا، در صورت عدم وجود دیتا به حالت خواب<sup>۴</sup> رفته و تا زمان دریافت دیتا در همان حالت باقی می ماند.
  - با دریافت دیتا توسط ماژول لورا وقفه ای خارجی رخ داده و میکرو را از حالت خواب بیدار می کند.
  - میکرو کنترلر با برقراری ارتباط از طریق SPI با ماژول لورا دیتای دریافت شده را خوانده و پس از بررسی یکسان بودن شناسه دریافت کننده با شناسه خود آن را از طریق USB به رایانه ارسال می کند.
  - در صورت عدم وجود دیتاهای دیگر، میکرو کنترلر به حالت خواب رفته و تا رخ دادن وقفه بعدی، که نشان دهنده دریافت اطلاعات توسط ماژول لورا است، در همان حال باقی می ماند.
- برنامه دسکتاپ که با زبان Python نوشته شده است، متشکل از سه بخش Home، Charts و Log می باشد. در بخش Home اطلاعات آخرین دیتای دریافت شده به نمایش درمی آید. در بخش Charts نمودارهای دیتاهای دریافتی در بازه قابل تعیین توسط کاربر به نمایش درمی آید. تمام رخدادهایی که در ارتباط با دستگاه رخ می دهد نظیر دریافت دیتای جدید و یا اتصال یا قطع اتصال دستگاه در تب Log با ذکر زمان لیست می شوند. نحوه عملکرد برنامه دسکتاپ به شرح زیر است:
- با اجرای برنامه Thread اصلی وظیفه ترسیم رابط گرافیکی برنامه<sup>۵</sup>، که با PyQt5 پیاده سازی شده است، را برعهده می گیرد.

<sup>1</sup>Stop

<sup>2</sup>Alarm

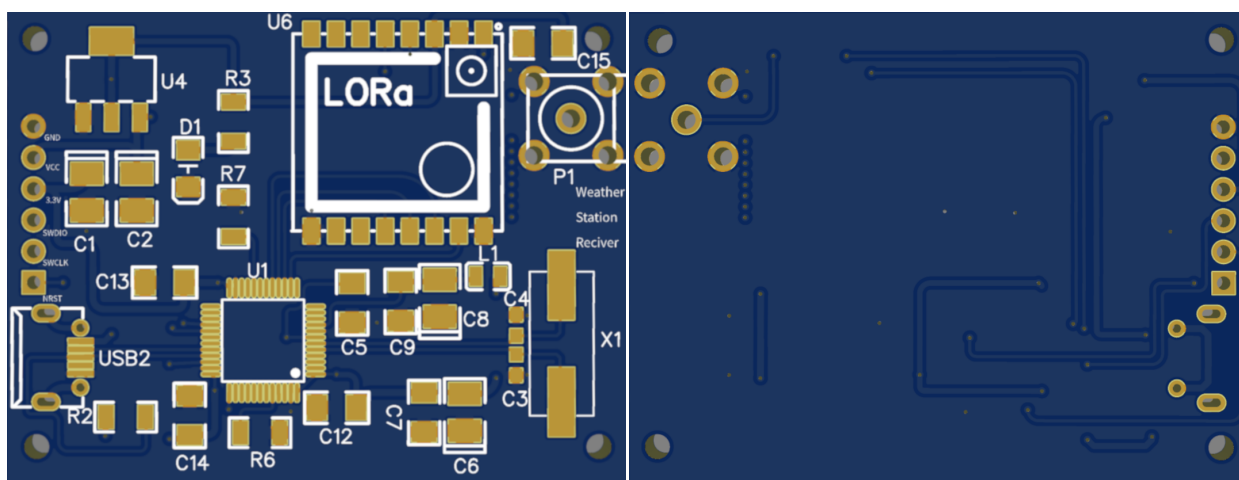
<sup>3</sup>Continuously

<sup>4</sup>Sleep

<sup>5</sup>Graphical user interface (GUI)

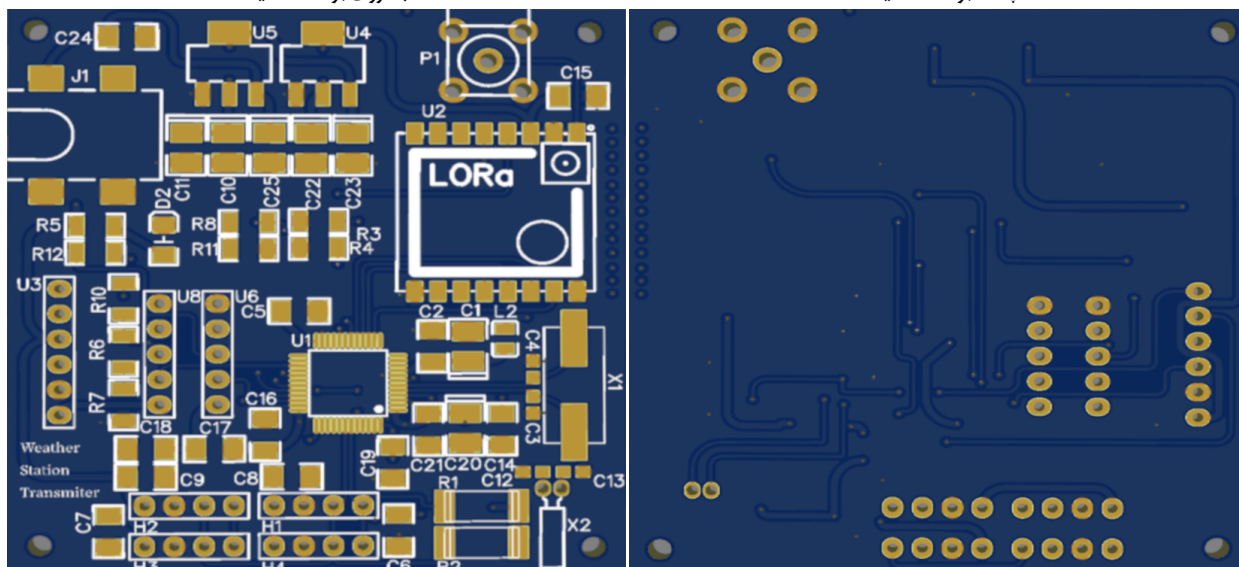
- در همین حین Thread دیگر به کمک کتابخانه libusb مسئول بررسی وضعیت اتصال دستگاه به رایانه و دریافت اطلاعات ارسالی از دستگاه می‌شود.
- در صورت تغییر وضعیت اتصال و یا دریافت اطلاعات، مشخصات آن در تب Log ثبت می‌شود و برای کاربر قابل مشاهده خواهد بود.
- هنگام دریافت اطلاعات جدید از طریق USB علاوه بر نمایش در تب اصلی برنامه، به‌روزرسانی تب Charts با اطلاعات جدید و ثبت رخ داد در تب Log، مشخصات کامل آن در دیتابیس SQLite در کنار فایل اجرایی برنامه نیز ذخیره می‌شود.
- در تب Charts با انتخاب بازه زمانی، نمودارها با توجه به اطلاعات ثبت شده آن بازه زمانی در دیتابیس بروز می‌شوند.

## ۵ طراحی برد مدار چاپی



(ب) روی برد سمت ایستگاه

(آ) پشت برد سمت ایستگاه



(د) روی برد سمت سنسور

(ج) پشت برد سمت سنسور

شکل ۷: تصاویر برد مدار چاپی طراحی شده برای هر دو سمت ایستگاه و سنسور.

برد مدار چاپی<sup>۱</sup> بردی است که با کانکتور و ترک‌هایی که روی آن قرار دارد قطعات را به‌طور الکتریکی به یکدیگر متصل می‌کند.

<sup>۱</sup> Printed Circuit Board (PCB)

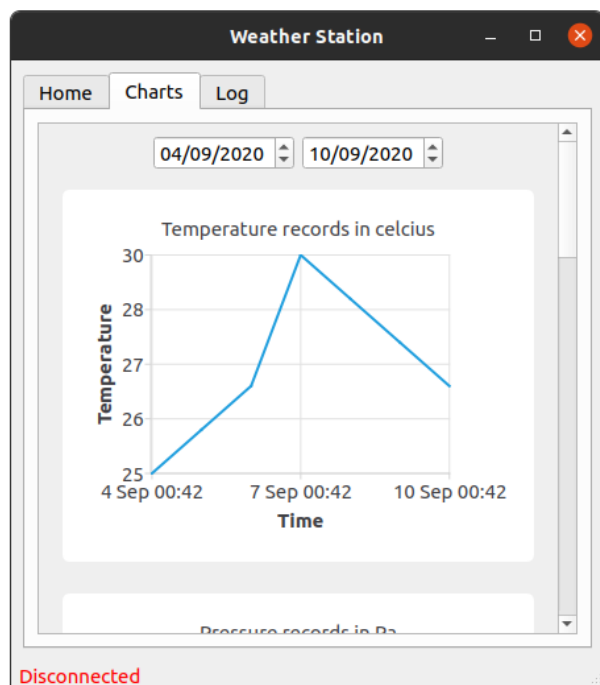
بردمدارچاپی به طور کلی متشکل از هسته‌ای محکم معمولاً از جنس فیبرشیشه FR4 و لایه‌های مسی نازک که در یک یا دو طرف آن قرار دارند می‌شود. ترک‌ها و پدها روی لایه‌های مسی و پس از حل کردن مس سایر بخش‌ها در اسید به وجود می‌آیند. برای محافظت از تماس ناخواسته ترک‌های مسی با قطعات و ذرات رسانا و همچنین جدا نمودن محل‌های لحیم‌کاری از سایر بخش‌ها، بر روی لایه مسی لایه‌ی Solder mask قرار می‌گیرد که معمولاً به رنگ سبز است.

یکی از موارد مهم در مرحله طراحی بردمدارچاپی توجه به تأثیرات نویز در مدار و تلاش به کاهش اثرات آن است. نویزها می‌تواند به دو صورت الکتریکی (در اثر خاصیت خازنی بین دو هادی) و مغناطیسی (در اثر خاصیت سلفی هادی) به وجود بیایند. منابع اصلی نویز سیگنال‌های پرودیک با فرکانس بالا نظیر زوج سیم‌های تفاضلی (D+ و D- موجود در USB) یا سیگنال‌های ساعت<sup>۱</sup> هستند.

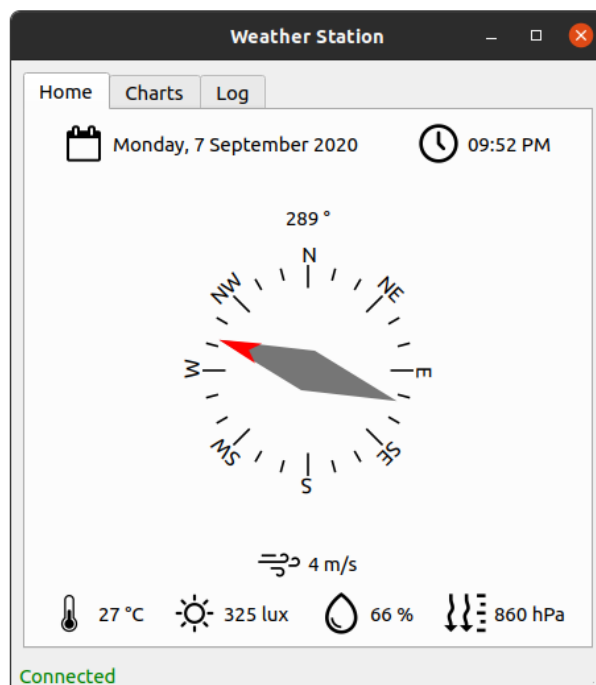
با عبور جریان از یک هادی میدان مغناطیسی در اطراف آن به وجود می‌آید و در صورت وجود هادی‌ای دیگر در نزدیکی آن میدان تولیدشده روی آن تأثیر گذاشته و باعث ایجاد جریان در هادی دوم می‌شود. همچنین وجود اختلاف پتانسیل بین دو هادی مجاور سبب ایجاد میدان الکتریکی شده و تغییرات پتانسیل یک هادی روی دیگری همانند صفحات یک خازن اثر می‌گذارد. کاهش طول هادی‌هایی که از عوامل مؤثر در کاهش این نوع نویزها است. استفاده از خازن‌های کوپلاژ برای میکروکنترلر [۱۲]، استفاده از فیلترهای RC و LC، استفاده از Polygon (یا Pour) و استفاده از انواع شیلد و محافظ‌های زمین شده، از روش‌ها کاهش انواع نویز هستند که در طراحی بردمدارچاپی باید به آن‌ها توجه کرد. بردهای این پروژه نیز مطابق با این نکات طراحی شده‌اند. تصویر بردمدارچاپی طراحی شده این پروژه در شکل ۷ آمده است.

## ۶ نتایج

خروجی اطلاعات جمع‌آوری و مخابره شده توسط دستگاه بر روی رایانه و به کمک برنامه ساخته شده به همین منظور در سمت ایستگاه قابل مشاهده خواهد بود. جهت انجام بررسی‌های جزئی و ابتدایی به جهت پیش‌بینی وضعیت آب‌وهوایی بر روی دیتاهای دریافتی، می‌توان از نمودار دیتاهای دریافتی که در تب Charts برنامه قائل مشاهده است استفاده نمود. همچنین مشخصات و



(ب) نمایش نمودارهای اطلاعات دریافت شده در تب Charts.



(آ) نمایش آخرین دیتاهای دریافتی برنامه در تب Home.

شکل ۸: تصاویر محیط برنامه دسکتاپ.

<sup>۱</sup> Clock

جزئیات آخرین دیتای دریافت شده نیز در تب Home این نرم افزار قابل مشاهده است. تصاویری از محیط برنامه در شکل ۸ آمده است.

## ۷ نتیجه گیری

در انجام تست های عملی مشخص شد برد مفید مائول لورا علاوه بر وابستگی ای که به پارامترهای پهنای باند، ضریب پخش و توان دارد، به شدت به نوع آنتن وابسته است و نیازمند توجه ویژه ای به مسئله تطبیق امپدانس ترک های آنتن خروجی در طراحی برد مدار چاپی است. به دلیل در دسترس نبودن معیار دقیقی برای سنجش سرعت باد نتیجه گیری در مورد دقت اندازه گیری سرعت باد اشتباه است اما با انجام آزمایشات متعدد دقت اندازه گیری جهت باد با سرعت متوسط و در دمای اتاق  $\pm 4$  درجه به دست آمد. همچنین مشخص شد تغییر فاصله فرستنده و گیرنده های آلتراسونیک از یکدیگر و از زمین، عاملی مؤثر در تعیین دقت اندازه گیری و ماکسیموم سرعت قابل اندازه گیری است. به طوری که با نزدیک تر قرار دادن فرستنده و گیرنده (تا حداقل ۴ سانتی متر) سرعت قابل اندازه گیری ماکسیموم و دقت اندازه گیری مینیموم می شود.

سورس کد تمامی پخش های پروژه به صورت متن باز در وبگاه GitHub به نشانی زیر در دسترس است:  
<https://github.com/jmdmahdi/Weather-Station>

## مراجع

- [1] Wikipedia, "Weather station," 2020. [Online; accessed August 13, 2020].
- [2] S. Schiavon, T. Hoyt, and A. Piccioli, "Web application for thermal comfort visualization and calculation according to ASHRAE standard 55," *Building Simulation*, vol.7, pp.321–334, Dec. 2013.
- [3] P. Chandran, R. Bhakthavatchalu, and P. P. Kumar, "Time of flight measurement system for an ultrasonic anemometer," in *2016 International Conference on Control, Instrumentation, Communication and Computational Technologies (ICCICCT)*, pp.734–737, 2016.
- [4] O. Cramer, "The variation of the specific heat ratio and the speed of sound in air with temperature, pressure, humidity, and co2 concentration," *The Journal of the Acoustical Society of America*, vol.93, no.5, pp.2510–2516, 1993.
- [5] K. Rasmussen, "Calculation methods for the physical properties of air used in the calibration of microphones," 1997.
- [6] R. S. Davis, "Equation for the determination of the density of moist air (1981/91)," *Metrologia*, vol.29, no.1, pp.67–70, 1992.
- [7] B. Sortec, "Digital pressure sensor," *May 7th*, 2015.
- [8] M. Integrated, "Max44009 industry's lowest-power ambient light sensor with adc," *19-5719; Rev 0; 1/11*.
- [9] Honeywell, "3-axis digital compass ic hmc5883l," *Form 900405 Rev E*, 2013.

- [10] SEMTEH, “Sx1276/77/78/79 - 137 mhz to 1020 mhz low power long range transceiver,” *Rev. 4*, 2015.
- [11] ASAIR, “Aht10 technical manual,” *V1.1*, 2018.
- [12] STMicroelectronics, “An2586 application note,” *Doc ID 13675 Rev 7*, 2011.