



دانشگاه صنعتی امیرکبیر

(پلی‌تکنیک تهران)

دانشکده مهندسی کامپیووتر

پروژه کارشناسی

پیاده‌سازی سیستم نگهداری و تعمیرات پیش‌بینانه
تجهیزات بر بستر اینترنت اشیاء مبتنی بر تحلیل لرزش

نگارنده

استاد راهنما

دکتر حمیدرضا زرندي

تیر ۱۴۰۲

بِسْمِ اللّٰهِ الرَّحْمٰنِ الرَّحِيْمِ

صفحه فرم ارزیابی و تصویب پایان نامه- فرم تأیید اعضاء کمیته دفاع

در این صفحه فرم دفاع یا تایید و تصویب پایان نامه موسوم به فرم کمیته دفاع- موجود در پرونده آموزشی- را قرار دهید.

نکات مهم:

- نگارش پایان نامه/رساله باید به **زبان فارسی** و بر اساس آخرین نسخه دستورالعمل و راهنمای تدوین پایان نامه های دانشگاه صنعتی امیرکبیر باشد.(دستورالعمل و راهنمای حاضر)
- رنگ جلد پایان نامه/رساله چاپی کارشناسی، کارشناسی ارشد و دکترا باید به ترتیب مشکی، طوسی و سفید رنگ باشد.
- چاپ و صحافی پایان نامه/رساله بصورت **پشت و رو(دورو)** بلامانع است و انجام آن توصیه می شود.



دانشگاه صنعتی امیرکبیر
(پلی‌تکنیک تهران)

به نام خدا

تاریخ: تیر ۱۴۰۲

تعهدنامه اصالت اثر

اینجانب متعهد می‌شوم که مطالب مندرج در این پایان‌نامه حاصل کار پژوهشی اینجانب تحت نظارت و راهنمایی اساتید دانشگاه صنعتی امیرکبیر بوده و به دستاوردهای دیگران که در این پژوهش از آنها استفاده شده است مطابق مقررات و روال متعارف ارجاع و در فهرست منابع و مأخذ ذکر گردیده است. این پایان‌نامه قبلاً برای احراز هیچ مدرک هم‌سطح یا بالاتر ارائه نگردیده است.

در صورت اثبات تخلف در هر زمان، مدرک تحصیلی صادر شده توسط دانشگاه از درجه اعتبار ساقط بوده و دانشگاه حق پیگیری قانونی خواهد داشت.

کلیه نتایج و حقوق حاصل از این پایان‌نامه متعلق به دانشگاه صنعتی امیرکبیر می‌باشد. هرگونه استفاده از نتایج علمی و عملی، واگذاری اطلاعات به دیگران یا چاپ و تکثیر، ترجمه و اقتباس از این پایان‌نامه بدون موافقت کتبی دانشگاه صنعتی امیرکبیر ممنوع است. نقل مطالب با ذکر مأخذ بلامانع است.

امضا

نویسنده مایان نامه، در صورت تایل میتواند برای پیمان نامه خود را به شخص یا اشخاص و یا ارگان خاصی تقدیم نماید.

سپاه کزاری

نویسنده پایان‌نامه می‌تواند مراتب امتحان خود را نسبت به استاد راهنمای و استاد مشاور و یا دیگر افرادی که طی انجام پایان‌نامه به نحوی او را یاری و یا با او همکاری نموده‌اند ابراز دارد.

چکیده

در سال‌های اخیر اینترنت اشیاء به یکی از داغ‌ترین موضوعات فناوری تبدیل شده است. کاربرد این فناوری در تمامی حوزه‌های زندگی انسان و همچنین پیشرفت‌های اخیر در حوزه‌های جمع‌آوری داده، شبکه و هوش مصنوعی باعث شده‌اند که اینترنت اشیاء مورد توجه محققان قرار گیرد. یکی از چالش‌های موجود در صنایع و کارخانه‌ها تعویض بهینه قطعات است. با توجه به نبود اطلاعات کافی برای تحلیل وضعیت قطعات، راه حل مناسب برای اطمینان از کارکرد خط تولید، استفاده از متخصصان جهت بازرگانی از وضعیت تجهیزات یا تعویض آنها بدون توجه به وضعیت فعلی و صرفاً طبق زمان‌بندی قبلی است. این راه حل‌ها علاوه بر نداشتن دقت لازم، هزینه و زمان زیادی بر صنایع تحمیل می‌کنند. در این پروژه قصد داریم که با استفاده از ترکیب اینترنت اشیاء و هوش مصنوعی، چارچوبی برای تحلیل داده‌های لرزش تجهیزات ارائه گردد تا با استفاده از آن بتوان عمر مفید باقیمانده قطعات را بخوبی پیش‌بینی کرد. همچنین با استفاده از درگاه مبتنی بر وب، نتایج حاصله به افراد متخصص نشان داده شود تا بتوانند برنامه‌ریزی دقیقی برای نگهداری و تعمیر تجهیزات ارائه کنند. با بکارگیری این رویکرد هزینه و وقت صرف شده برای تعویض قطعات به شکل چشمگیری کاهش می‌یابد.

واژه‌های کلیدی:

اینترنت اشیاء، نگهداری پیش‌بینانه، اینترنت اشیاء صنعتی، نگهداری سیستم سایبری-فیزیکی

فهرست مطالب

عنوان	صفحة
۱ مقدمه	۱
۱-۱ تعمیر و نگهداری	۲
۲-۱ راهکار پیشنهادی	۳
۳-۱ کارهای مشابه	۳
۲ مفاهیم پایه و تجهیزات	۵
۱-۲ حسگر	۶
۲-۲ گره انتهایی	۷
۳-۲ پروتکل ارتباطی	۸
۱-۳-۲ استاندارد زیگبی	۸
۲-۳-۲ ویژگی‌های زیگبی	۹
۳-۳-۲ دسته‌بندی دستگاهها	۱۱
۴-۳-۲ توپولوژی	۱۲
۵-۳-۲ دیجی بین‌الملل	۱۳
۶-۳-۲ طرز کار دستگاه‌های ایکس‌بی	۱۳
۷-۳-۲ ارتباط سریال ماژول‌های ایکس‌بی	۱۵
۴-۲ دروازه	۱۷
۵-۲ پایگاه داده‌ی سری زمانی	۱۸
۶-۲ پیش‌پردازش	۱۹
۷-۲ برنامه‌ی تحت وب	۲۰
۸-۲ جمع‌بندی و نتیجه‌گیری	۲۱
۳ پیاده‌سازی سیستم	۲۲
۱-۳ معماری کلی سیستم	۲۳
۲-۳ گره انتهایی و آردوینو	۲۳
۱-۲-۳ خواندن از حسگر و نمونه‌برداری	۲۴

۲۵	۲-۲-۳ تشكيل فريم زيگبي و نوشتن در درگاه سريال
۲۹	منابع و مراجع
۳۲	پيوست
۳۳	واژه‌نامه‌ی فارسی به انگلیسی
۳۵	واژه‌نامه‌ی انگلیسی به فارسی

فهرست اشکال

صفحه

شکل

۱-۱	سیاست‌های انجام تعمیرات و نگهداری [۱]	
۲
۱-۲	حسگر مدل ADXL 345
۷
۲-۲	بورد آردینو نانو
۷
۳-۲	مقایسه پروتکل زیگبی و سایر پروتکل‌های اینترنت اشیاء
۹
۴-۲	شبکه زیگبی شامل هماهنگ‌کننده، مسیریاب و گره‌پایانی [۱۰]
۱۲
۵-۲	توپولوژی‌های مختلف شبکه زیگبی [۱۱]
۱۳
۶-۲	ماژول زیگبی مدل XBee S2
۱۴
۷-۲	فرایندهای لازم برای ارتباط دو ماژول ایکس‌بی [۱۲]
۱۴
۸-۲	ارتباط سریال در حالت شفاف [۱۲]
۱۵
۹-۲	ارتباط سریال در حالت API [۱۲]
۱۷
۱۰-۲	بورد زبری‌پایی ۴ مدل بی
۱۸
۱۱-۲	پلتفرم متن باز پایگاه داده سری زمانی InfluxDB [۱۵]
۱۹
۱-۳	نمای کلی سیستم
۲۴
۲-۳	ساختار فایل کتابخانه ایکس‌بی
۲۶
۳-۳	ساختار کلی فریم API [۱۲]
۲۶

فهرست جداول

صفحه

جدول

۱-۲ مقایسه بین دو نوع حسگر مبتنی بر پیزوالکتریک و MEMS [۵]	۶
۱-۳ بخش‌های مختلف داده‌های فریم درخواست ارسال [۱۲]	۲۷

فهرست نمادها

نماد	مفهوم
\mathbb{R}^n	فضای اقلیدسی با بعد n
\mathbb{S}^n	کره یکه n بعدی
M^m	خمینه m -بعدی
$\mathfrak{X}(M)$	جبر میدان‌های برداری هموار روی M
$\mathfrak{X}^1(M)$	مجموعه میدان‌های برداری هموار یکه روی (M, g)
$\Omega^p(M)$	مجموعه p -فرمی‌های روی خمینه M
Q	اپراتور ریچی
\mathcal{R}	تانسور انحنای ریمان
ric	تانسور ریچی
L	مشتق لی
Φ	۲-فرم اساسی خمینه تماسی
∇	التصاق لوی-چویتای
Δ	لاپلاسین ناهموار
∇^*	عملگر خودالحاق صوری القا شده از التصاق لوی-چویتای
g_s	متر ساساکی
∇	التصاق لوی-چویتای وابسته به متر ساساکی
Δ	عملگر لاپلاس-بلترامی روی p -فرم‌ها

مقدمه

فصل اول

۱-۱ تعمیر و نگهداری

در دنیای نوین امروز، وابستگی به فناوری و صنایع مختلف برای ارائه خدمات و تولید محصولات مورد نیاز بشدت افزایش یافته است. در نتیجه این افزایش، تعداد کارخانه‌ها و تجهیزات برای رفع این نیازها نیز افزایش یافته است. همه تجهیزات و وسایل پس از استفاده زیاد دچار نقص و فراوانی می‌شوند. خرابی تجهیزات در کارخانه‌ها و خطوط تولید پدیده‌ای نامطلوب است. خرابی تجهیزات باعث ایست خطر تولید و وارد کردن ضرر مالی به صاحبان کارخانه‌ها خواهد شد. بهمین دلیل، تعمیر و نگهداری تجهیزات اهمیت بالایی دارد.

سیاست‌های انجام تعمیرات و نگهداری به سه دسته اصلی تقسیم می‌شوند؛ که در [شکل ۱-۱](#) آورده شده است:



شکل ۱-۱: سیاست‌های انجام تعمیرات و نگهداری [\[۱\]](#)

این سیاست‌ها عبارتند از:

- **نگهداری اصلاحی^۱:** این نوع نگهداری با اتفاق افتادن خرابی رخ می‌دهد و تنها در صورت خرابی قطعه تعمیر انجام می‌شود. همانطور که مشخص است در این حالت روند کارکرد عادی متوقف می‌شود: به علاوه، در این حالت تعمیر می‌تواند با تأخیر انجام شود زیرا ممکن است در لحظه قطعات مورد نیاز برای تعمیر موجود نباشد. از این سیاست بیشتر به عنوان مکملی برای سیاست‌های بعدی استفاده می‌شود [\[۲\]](#).

- **نگهداری پیش‌گیرانه^۲:** در این حالت، نگهداری و تعمیر بر اساس رابطه بین نرخ خرابی، توزیع زمان خرابی و سایر آستانه‌هایی که از تعداد زیادی از آمارهای خرابی بدست می‌آید زمان‌بندی می‌شود. در واقع در این نوع نگهداری هدف کاهش احتمال خرابی قطعات است. این نوع نگهداری

¹Corrective Maintenance

²Preventive Maintenance

با توجه به نوع اطلاعات به سیاست‌های وابسته عمر،^۳ سیاست‌های دوره‌ای^۴، سیاست‌های ترتیبی^۵ و سیاست‌های محدود‌کننده خرابی^۶ تقسیم می‌شوند^[۱].

- نگهداری پیش‌بینانه^۷: این نوع نگهداری بر روند کاهش کارایی قطعات با استفاده از وضعیت آنها نظارت کرده، وضعیت آنها را در آینده پیش‌بینی می‌کند و مداوم برنامه تعمیر و نگهداری را بروزرسانی می‌کند، تا اینکه شرایط توقف بروزرسانی برآورده شود. با توجه به این ویژگی، این سیاست فقط برای تجهیزاتی که وضعیت آنها قابل نظارت است می‌تواند استفاده شود^[۲].

۲-۱ راهکار پیشنهادی

با توجه به اهمیت نگهداری و نقش نگهداری اصولی در کاهش هزینه، در این پژوهه به ایجاد چارچوبی مناسب برای ارائه راهکاری بر مبنای سیاست نگهداری پیش‌بینانه می‌پردازیم. یکی از نیازهای این سیاست حجم زیادی از داده جمع‌آوری شده از وضعیت تجهیزات برای پیش‌بینی دقیق است. در این پژوهه در بستر اینترنت اشیاء^۸ داده‌های لرزش با استفاده از سنسور MEMS^۹ جمع‌آوری شده و در زمان‌های مشخص با استفاده از پروتکل زیگبی^{۱۰} برای دروازه^{۱۱} فرستاده می‌شود. پس از جمع‌آوری حجم مشخصی از داده‌های اطلاعات برای پردازش بیشتر به سرور فرستاده می‌شوند. در انتهای نیز اطلاعات پردازش شده و تخمین عمر مفید باقیمانده^{۱۲} در یک صفحه وب نمایش داده می‌شود.

۳-۱ کارهای مشابه

در [۲] مدلی برای خرابی قطعات مبتنی بر میزان استفاده از تجهیزات و بار داخلی آنها ارائه شده است اما مدل ارائه شده محدود به یک مدل تجهیزات است و برای استفاده در سایر مدل‌ها نظارت مجدد لازم است. در [۳] رویکردی مبتنی بر شبکه عصبی جهت پیش‌بینی عمر مفید باقیمانده تجهیزات چرخی

³Age Dependent Strategies

⁴Periodic Strategies

⁵Sequential Strategies

⁶Failure Limited Strategies

⁷Predictive Maintenance

⁸Internet of Things

⁹Micro Electric Mechanical Sensor

¹⁰Zigbee Protocol

¹¹Gateway

¹²Remaining Useful Lifetime(RUL)

ارائه شده است اما تنها مختص به این دسته از تجهیزات است. در [۴] رویکردنی بر شبکه عصبی جهت پیش‌بینی زمان نگهداری و تعمیرات تجهیزات بر اساس مدل خرایی و کارایی آنها ارائه می‌شود اما در یک محیط شبیه‌سازی شده و کنترل شده آزمایش شده است و در هنگام استفاده در محیط واقعی غیرعملی است.

بطور کلی در پژوهش‌های یادشده رویکردهای ارائه شده مختص نوع خاصی از تجهیزات است و در یک محیط آزمایشگاهی و کنترل شده ارزیابی شده‌اند. در حالیکه در این پژوهش با استفاده از داده‌های جمع‌آوری شده از قطعات مختلف سعی کرده‌ایم رویکردنی کلی و مناسب محیط واقعی و صنعتی ارائه دهیم.

فصل دوم

مفاهیم پایه و تجهیزات

در این فصل به بررسی مفاهیم و تجهیزاتی که در این پژوهه استفاده شده است می‌پردازیم. در هر بخش دلیل انتخاب خود را شرح می‌دهیم و آن را با سایر راه حل‌ها مقایسه می‌کنیم.

۱-۲ حسگر

همانطور که گفته شد برای پیش‌بینی نگهداری و عمر مفید تجهیزات نیاز به نظارت و جمع‌آوری اطلاعاتی راجع به این تجهیزات داریم. در این پژوهه، اطلاعات جمع‌آوری شده مربوط به وضعیت لرزش تجهیزات است که با استفاده از حسگرهای لرزش MEMS اندازه‌گیری می‌شوند.

در این پژوهه تصمیم گرفتیم که بجای دما یا رطوبت از لرزش تجهیزات برای پیش‌بینی استفاده کنیم؛ زیرا لرزش برخلاف دو معیار دیگر بطور مستقیم شرایط عملیاتی تجهیزات را منعکس می‌کند که بیشتر بر اساس رفتارهای مکانیکی مانند چرخش موتور یا حرکت جریان در لوله ایجاد می‌شوند. هم‌چنین دو معیار دیگر وابستگی زیادی به محیط دارند اما لرزش تقریباً مستقل از عوامل خارجی است^[۵]. برای اندازه‌گیری لرزش دو نوع حسگر لرزش وجود دارد. حسگرهای مبتنی بر شتاب‌سنج MEMS بر اکثر محدودیت‌های حسگرهای قدیمی مبتنی بر پیزوالکتریک^۱ غلبه می‌کنند. تفاوت این دو حسگر را می‌توان در جدول ۱-۲^[۵] دید.

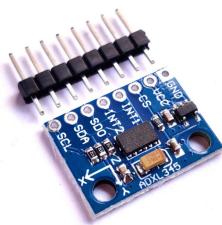
جدول ۱-۲: مقایسه بین دو نوع حسگر مبتنی بر پیزوالکتریک و MEMS [۵]

MEMS	پیزوالکتریک	
۱۰۴	۳۰۰+	قیمت (دلار)
۳	۲۷	توان مصرفی (mW)
۰۵/۰ × ۲/۰ × ۲/۰	۱ × ۹۸/۰ × ۹۷/۱	اندازه (اینچ)
۴۰۰۰	۷۰۰	تراکم نویز (μg)
۱۰۰	۱۰	بازه شتاب (g)

بطور کلی حسگرهای نوع MEMS ارزان‌تر، کم‌صرف‌تر و کوچک‌تر هستند. در این پژوهه حسگرهای با باتری کار خواهند کرد و برای اندازه‌گیری به قطعات مورد نظر متصل می‌شوند. بنابراین کم‌صرف‌بودن، ارزانی و کوچک‌بودن برای اتصال به بدنه ویژگی‌های مطلوبی است که در حسگرهای نوع MEMS یافت می‌شود. شکل ۱-۲ حسگر مدل ADXL 345 که در این پژوهه استفاده کرده‌ایم.

این حسگر می‌تواند شتاب را در سه جهت، در چهار بازه قابل تنظیم ۲، ۴، ۸ و ۱۶ برابر گرانش با

^۱Piezoelectric

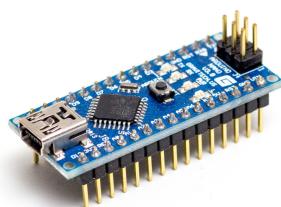


شکل ۱-۲: حسگر مدل ADXL 345

دقتهای متفاوت اندازه‌گیری کند. خروجی این حسگر نیز با دو پروتکل I2C^۳ و SPI^۴ قابل انتقال است.

۲-۲ گره انتهایی

برای کاهش بیشتر مصرف انرژی، دریافت اطلاعات حسگر و فرستادن آن برای دروازه به یک بورد^۵ نیاز داریم. بوردهای آردوبینو^۶ اگرچه محدودیتهایی دارند، اما با توجه به ارزان بودن و برآورده کردن نیاز ما انتخاب مناسبی هستند. بورد استفاده شده در این پروژه آردوبینو نانو است که در شکل ۲-۲ قابل مشاهده است. در این بورد از پورت سریال^۷ برای ارتباط با مژول زیگبی^۸ و از پروتکل I2C برای ارتباط با حسگر استفاده می‌کنیم. یکی از محدودیتهای این بورد حافظه کم است که در نرخ‌های بالای نمونه برداری حسگر کار ما را سخت می‌کند که در فصل بعد بیشتر به آن می‌پردازیم.



شکل ۲-۲: بورد آردوبینو نانو

²Serial Peripheral Interface

³Board

⁴Arduino

⁵Serial Port

⁶Zigbee Module

۳-۲ پروتکل ارتباطی

برای ارسال اطلاعات از گره‌های متصل به حسگر به دروازه نیاز به یک پروتکل ارتباطی داریم. نیازهای ما در رابطه با این پروتکل عبارتند از:

- کم‌صرف‌بودن: با توجه به اینکه گره‌های ما به باتری متصل هستند، به پروتکلی نیاز داریم که در مصرف انرژی بسیار بهینه عمل کند تا بتوان بدون تعویض باتری اطلاعات را تا چند سال برای دروازه فرستاد.
- پوشش و نفوذ سیگنال: در هر کارخانه یک دروازه نصب شده است، کارخانه‌ها مساحتی متوسط دارند و مانع خاصی نیز در آنها وجود ندارد. پس نیاز به پوشش یا قدرت نفوذ بالایی در سیگنال ارسالی نداریم.
- توپولوژی^۵: با توجه به وجود یک دروازه و چندین گره که همگی اطلاعات را برای دروازه ارسال می‌کنند، نیاز به پروتکلی داریم که از توپولوژی ستاره پشتیبانی کند.
- ارتباط مطمئن^۶: ارسال ناقص و یا از دستدادن اطلاعات حسگرها می‌تواند باعث پیش‌بینی اشتباه شود. بنابراین، به پروتکلی با قابلیت ارتباط مطمئن و کنترل خطای نیاز داریم.

در شکل ۳-۲ پروتکل‌های ارتباطی با معیارهای مختلف مقایسه شده‌اند. بر اساس ویژگی‌های موردنیاز پروتکل زیگبی انتخاب مناسب‌تری نسبت به سایر پروتکل‌ها است که در ادامه آن را معرفی می‌کنیم.

۱-۳-۲ استاندارد زیگبی

زیگبی یکی از استانداردهای فرستنده-گیرنده^۹ در شبکه‌های حسگر بی‌سیم^{۱۰} است که بصورت گستردگی استفاده قرار گرفته است. زیگبی بر روی IEEE802.15.4 مشخصات شبکه شخصی بی‌سیم با نرخ داده پایین^{۱۱} را تعریف می‌کند تا بتواند از دستگاه‌های نظارتی و کنترلی با توان مصرفی و نرخ داده پایین پشتیبانی کند. زیگبی توسط اتحاد زیگبی^{۱۲} توسعه داده شده است؛ که صدها عضو دارد. اتحاد زیگبی

⁷Topology

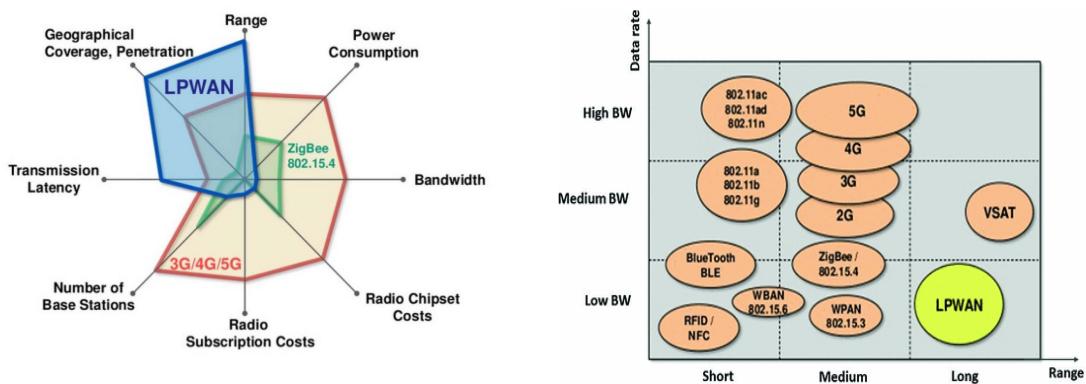
⁸Reliable Communication

⁹Transceiver

¹⁰Wireless Sensor Network

¹¹Low Rate Wireless Personal Area Network(LR-WPAN)

¹²Zigbee Alliance



(آ) مقایسه بر حسب نرخ داده و بازه پوشش [۶]
[۷] هزینه و پهنای باند

شکل ۳-۲: مقایسه پروتکل زیگبی و سایر پروتکل‌های اینترنت اشیاء

لایه‌های شبکه، امنیت و برنامه و IEEE802.15.4 لایه‌های سختافزار و کنترل دسترسی به رسانه^{۱۳} را تعریف می‌کند [۸].

استاندارد شبکه بی‌سیم زیگبی جای خالی‌ای را در بازار پر می‌کند که توسط سایر شرکت‌ها نادیده گرفته شده است. اکثر استانداردهای بی‌سیم به دنبال نزدیک شدن به اینترنت و رسیدن به سرعت‌های بالاتر هستند. اما زیگبی در تلاش است تا با ارائه نرخ ارسال پایین‌تر انتظار مصرف انرژی پایین را برآورده کند. سایر استانداردها به دنبال افروzen ویژگی^{۱۴}‌های بیشتر و ارائه خدماتی نظری استریم با کیفیت بالا^{۱۵} هستند؛ در حالیکه زیگبی با پشته^{۱۶} ای کوچک تنها هدف دارد که بتوان داده‌هایی با حجم کم و تعدد پایین مانند کنترل چراغ یا خواندن داده‌های سنسور دما را ارسال کرد [۹].

۲-۳-۲ ویژگی‌های زیگبی

قابلیت اطمینان بالا

ارتباطات بی‌سیم بطور کلی ارتباطات نامطمئنی هستند اما زیگبی در چند سطح قابلیت اطمینان بالایی فراهم می‌کند که عبارتند از:

¹³Media Access Control(MAC)

¹⁴Feature

¹⁵High-Definition Streaming

¹⁶Stack

- IEEE802.15.4: در آن از ترکیبی از فناوری‌هایی مانند O-QPSK^{۱۷} و DSSS^{۱۸} استفاده می‌شود که کارایی بسیار خوبی در محیط‌های با نرخ سیگنال به نویز پایین دارند.^[۹]
- CSMA-CA: زیگبی از این فناوری برای کنترل دسترسی به رسانه استفاده می‌کند. قبل از ارسال زیگبی به کanal گوش می‌دهد. اگر کسی در حال ارسال نباشد، اطلاعات خود را ارسال می‌کند. این روند از تداخل اطلاعات فرستنده‌های مختلف و ایجاد نیاز برای ارسال دوباره جلوگیری می‌کند.^[۹]
- کنترل خطای هر فریم^{۲۰} زیگبی از CRC^{۲۱} بیتی بعنوان چک‌سام^{۲۲} استفاده می‌شود که قابلیت تشخیص خطای هر فریم را ایجاد می‌کند.^[۹]
- فریم تایید: هر فریم در کل ۴ بار برای مقصد ارسال می‌شود(۳ بار ارسال مجدد). اگر باز هم فریم نتواند ارسال شود به مبدا اطلاع داده می‌شود.^[۹]

صرف انرژی پایین

ماژول‌های زیگبی در صرف انرژی بسیار بهینه هستند. یک شبکه زیگبی می‌تواند تا چند سال تنها با استفاده از باتری عمل کند. اگر استفاده از زیگبی به درستی مدیریت شود این زمان حتی می‌تواند به عمر باتری اگر بدون استفاده در قفسه بماند برسد. دلیل این استفاده کم این است که گره‌های زیگبی می‌توانند به خواب بروند. نیازی به نگهداشتن ارتباط برای باقی‌ماندن در شبکه ندارند.^[۹]

امنیت بالا

زیگبی با استفاده از استاندارد رمزگذاری پیشرفته^{۲۳} باعث می‌شود که تنها فرستنده و گیرنده از محتویات فریم اطلاع داشته باشند. هم‌چنین روندی برای احراز هویت گره‌ها هنگام اضافه شدن به شبکه بکار می‌برد که مانع اضافه شدن گره‌های مخرب به شبکه می‌شود.^[۹]

¹⁷Offset-Quadrature Phase-Shift Keying

¹⁸Direct Sequence Spread Spectrum

¹⁹Carrier Sense Multiple Access Collision Avoidance

²⁰Frame

²¹Cyclic Redundancy Check

²²Checksum

²³Advanced Encryption Standard(AES)

۳-۳-۲ دسته‌بندی دستگاه‌ها

دسته‌بندی فیزیکی

با توجه به توانایی‌های پردازشی دو نوع دستگاه در IEEE802.15.4 آورده شده است:

- دستگاه با عملکرد کامل^{۲۴}: این دستگاه‌ها توانایی انجام همه‌ی اعمال استاندارد مانند مسیریابی^{۲۵}، هماهنگی^{۲۶} و ارسال اطلاعات حسگر را دارند. در استاندارد فعلی این دستگاه‌ها باید همیشه روشن باشند [A].
- دستگاه با عملکرد کاهش‌یافته^{۲۷}: این دستگاه‌ها تنها توانایی ارسال داده‌های حسگر را دارند و می‌توانند به خواب بروند [A].

دسته‌بندی منطقی

در این دسته‌بندی سه نوع دستگاه وقود دارد:

- هماهنگ‌کننده: ریشه درخت شبکه را تشکیل می‌دهد و می‌تواند به شبکه‌های دیگر متصل شود. در هر شبکه دقیقاً یک هماهنگ‌کننده وجود دارد. هماهنگ‌کننده مسئول راه‌اندازی شبکه و انتخاب پارامترهای شبکه مانند کانال فرکانس رادیویی^{۲۸}، شناسه یکتای شبکه و تنظیم سایر پارامترهای عملیاتی است. همچنین می‌تواند اطلاعات مربوط به شبکه و کلیدهای امنیتی را ذخیره کند [A].
- مسیریاب: مسیریاب بعنوان گره میانی عمل می‌کند و داده‌ها را از دستگاه‌های دیگر منتقل می‌کند. مسیریاب می‌تواند به یک شبکه از قبل موجود متصل شود، همچنین می‌تواند در خواستات اتصال سایر دستگاه‌ها را بپذیرد و نوعی فرستنده مجدد به شبکه باشد [A].

- گره پایانی: این دستگاه می‌تواند دستگاه‌های کم‌صرف یا با باتری باشد. آنها می‌توانند اطلاعات مختلفی را از حسگرها جمع‌آوری کنند و عملکرد کافی برای صحبت با والدین خود (هماهنگ‌کننده یا مسیریاب) را دارند اما نمی‌توانند داده‌ها را از دستگاه‌های دیگر ارسال کنند. این عملکرد

²⁴Fully Functional Device(FFD)

²⁵Routing

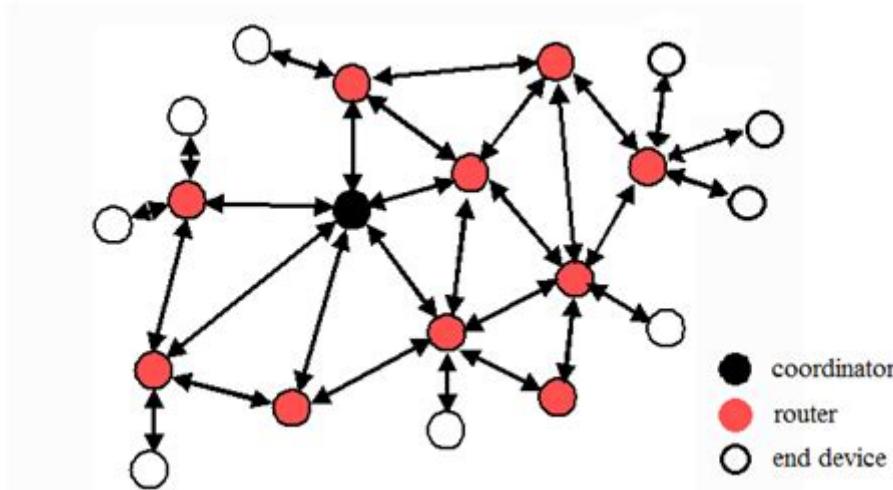
²⁶Coordination

²⁷Reduced Functional Device(RFD)

²⁸Radio Frequency Channel

کاهش یافته امکان کاهش هزینه را فراهم می‌کند. این دستگاه‌ها مجبور نیستند تمام مدت بیدار بمانند، در حالیکه دستگاه‌های متعلق به دو دسته دیگر باید بیدار بمانند [۸].

در شکل ۴-۲ [۱۰] می‌توان یک شبکه زیگبی را که شامل یک هماهنگ‌کننده، چند مسیریاب و چند گره پایانی است را مشاهده کرد.



شکل ۴-۲: شبکه زیگبی شامل هماهنگ‌کننده، مسیریاب و گره پایانی [۱۰]

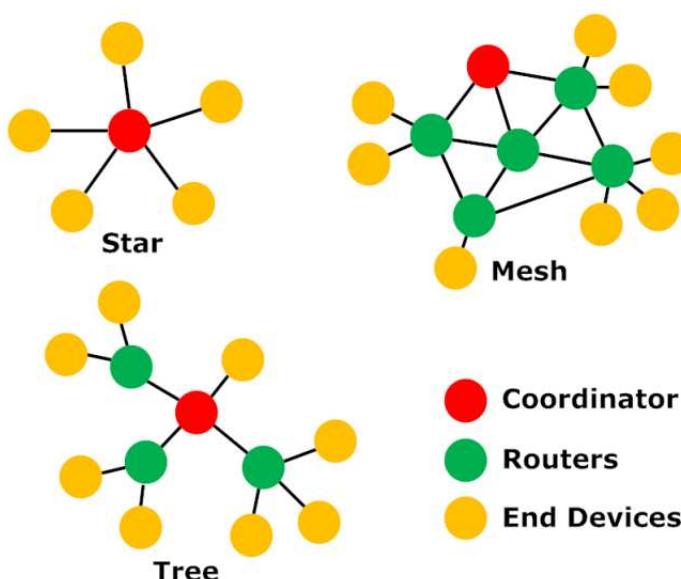
۴-۳-۲ توپولوژی

در زیگبی می‌توان سه توپولوژی زیر را داشت:

- ستاره: توپولوژی ستاره از یک هماهنگ‌کننده و تعدادی دستگاه پایانی تشکیل شده است. در توپولوژی ستاره، یک مدل شبکه master slave اتخاذ می‌شود که در آن master هماهنگ‌کننده و دستگاهی با عملکرد کامل است و slave دستگاهی با عملکرد کامل یا کاهش یافته است. دستگاه‌های انتهایی زیگبی بصورت فیزیکی و الکتریکی از یکدیگر جدا می‌شوند و اطلاعات را تنها از طریق هماهنگ‌کننده منتقل می‌کنند [۸].
- درخت خوش‌های^{۲۹}: این توپولوژی مانند توپولوژی ستاره است، با این تفاوت که در این توپولوژی سایر دستگاه‌ها می‌توانند با یکدیگر ارتباط برقرار کنند تا دستگاه‌های بیشتری بتوانند به دستگاه‌های با عملکرد کامل و غیر هماهنگ‌کننده متصل شوند تا بتوان شبکه را از لحاظ جغرافیایی گسترش داد [۸].

²⁹Cluster Tree

- مش^{۳۰}: در توپولوژی مش، هر گره می‌تواند با هر گره دیگری در محدوده خود ارتباط برقرار کند. توپولوژی مش برای نگهداری پیچیده است اما نسبت به خطأ مقاوم‌تر و قابل تحمل‌تر است [۱۸]. در شکل ۵-۲ [۱۹] می‌توان نقش گره‌های مختلف در توپولوژی‌های ذکر شده را مشاهده کرد.



شکل ۲: توپولوژی‌های مختلف شبکه زیگبی [۱۹]

۵-۳-۲ دیجی بین‌الملل

دیجی بین‌الملل^{۳۱} نام یکی از تولیدکنندگان ماژول‌های زیگبی است. ماژولی که ما در این پروژه استفاده می‌کنیم تولید این شرکت است. مدل این ماژول Digi XBee S2 است که می‌توان تصویر آن را در شکل ۶-۲ مشاهده کرد.

۶-۳-۲ طرز کار دستگاه‌های ایکس‌بی

دستگاه‌های ایکس‌بی از طریق هوا با یکدیگر ارتباط برقرار می‌کنند و پیام‌ها را به‌شکل بی‌سیم ارسال و دریافت می‌کنند. دستگاه‌ها فقط می‌توانند پیام‌ها را منتقل کنند ولی نمی‌توانند آنها را مدیریت کنند. با این حال، ماژول‌ها می‌توانند با دستگاه‌های هوشمند از طریق رابط سریال ارتباط برقرار کنند. دستگاه‌های ایکس‌بی داده‌های ورودی سریال را از طریق هوا منتقل می‌کنند و هر چیزی را که بصورت بی‌سیم دریافت می‌شود به خروجی سریال می‌فرستند. چه برای مقاصد ارتباطی و چه صرفاً برای

³⁰Mesh

³¹Digi International



شکل ۲-۶: ماژول زیگبی مدل XBee S2

پیکربندی دستگاه، ترکیبی از هر دو فرایند برای برقراری ارتباط لازم است. به این صورت، دستگاه‌های هوشمند مانند میکروکنترلر^{۳۲}‌ها یا رایانه‌های شخصی می‌توانند آنچه را که دستگاه ارسال می‌کند کنترل کرده و پیام‌های دریافتی و ارسالی را مدیریت کنند [۱۲].

دو فرایند لازم برای ارتباط را می‌توان در شکل ۷-۲ [۱۲] دید که عبارتند از:

- ارتباط بی‌سیم: این ارتباط بین ماژول‌های ایکس‌بی انجام می‌شود. ماژول‌هایی که قرار است با هم کار کنند باید بخشی از یک شبکه باشند و باید از یک فرکانس رادیویی استفاده کنند. همه ماژول‌هایی که این الزامات را برآورده می‌کنند می‌توانند بصورت بی‌سیم با یکدیگر ارتباط برقرار کنند.
- ارتباط سریال: این ارتباط بین ماژول ایکس‌بی و دستگاه هوشمند متصل به آن از طریق رابط سریال صورت می‌گیرد.



شکل ۷-۲: فرایندهای لازم برای ارتباط دو ماژول ایکس‌بی [۱۲]

^{۳۲}Microcontroller

۷-۳-۲ ارتباط سریال ماژول‌های ایکس‌بی

دستگاه‌های ایکس‌بی می‌توانند از اتصال سریال محلی خود به روش‌های بسیار متفاوتی استفاده کنند. حالت عملیاتی نحوه ارتباط دستگاه میزبان با ماژول ایکس‌بی را از طریق رابط سریال تعیین می‌کند. این حالت‌ها به دو دسته تقسیم می‌شوند که در ادامه به شرح هر کدام می‌پردازیم.

حالت شفاف

هنگام کار در حالت شفاف^{۳۳}، یک ماژول ایکس‌بی بعنوان جایگزین خط سریال عمل می‌کند. تمام داده‌های دریافت شده از طریق ورودی سریال بلافصله از طریق هوا منتقل می‌شود. هنگامی که ماژول ایکس‌بی داده‌های بی‌سیم را دریافت می‌کند، از طریق رابط سریال به همان شکل محل دریافت شده ارسال می‌شود. در واقع، ارتباط در حالت شفاف مانند آن است که دو ماژول توسط یک سیم به هم متصل شده باشند^[۱۲].

برای ارتباط دو ماژول ایکس‌بی، ماژول ارسال‌کننده به آدرس گیرنده نیاز دارد. هنگام کار در حالت شفاف، باید این آدرس را در ماژولی که در حال ارتباط است پیکربندی کرد. ماژول‌های ایکس‌بی می‌توانند آدرس ۶۴ بیتی کامل ماژول مقصد را ذخیره کنند^[۱۲]. این آدرس باید در دو پارامتر نوشته شود: آدرس مقصد بالا^{۳۴} و آدرس مقصد پایین^{۳۵}. بعنوان مثال برای ارتباط دو ماژول در این حالت باید مثل شکل ۸-۲^[۱۲] دو ماژول را پیکربندی کرد.



شکل ۸-۲: ارتباط سریال در حالت شفاف [۱۲]

حالت شفاف محدودیت‌هایی دارد. بعنوان مثال، هنگام کار با چند ماژول، باید قبل از ارسال هر پیام، مقصد را پیکربندی کرد. با این حال، حالت شفاف به دلایل زیر راهی آسان برای شروع کار با دستگاه‌های ایکس‌بی فراهم می‌کند:

^{۳۳}Transparent Mode

^{۳۴}Destination Address High(DH)

^{۳۵}Destination Address Low(DL)

- عملیات بسیار ساده است.
- آنچه ارسال می‌شود دقیقاً همان چیزی است که در مازول دیگر دریافت می‌شود.
- سازگار با هر دستگاهی است که بتواند از طریق یک رابط سریال ارتباط برقرار کند.

حالت API

حالت API یک رابط ساختاریافته را فراهم می‌کند که در آن داده‌ها از طریق رابط سریال در بسته‌های سازماندهی شده و به ترتیب تعیین شده ارتباط برقرار می‌کنند. این روند اجازه می‌دهد بدون نیاز به تعریف پروتکل، ارتباط پیچیده بین دستگاه‌ها برقرار کرد [۱۲].

در حالت شفاف تمام داده‌های دریافت شده از طریق ورودی سریال برای ارسال رادیویی در صورت قرار می‌گیرند و داده‌های دریافت شده به صورت بی‌سیم دقیقاً همان‌طور که دریافت شده‌اند، بدون اطلاعات اضافی به خروجی سریال ارسال می‌شوند [۱۲].

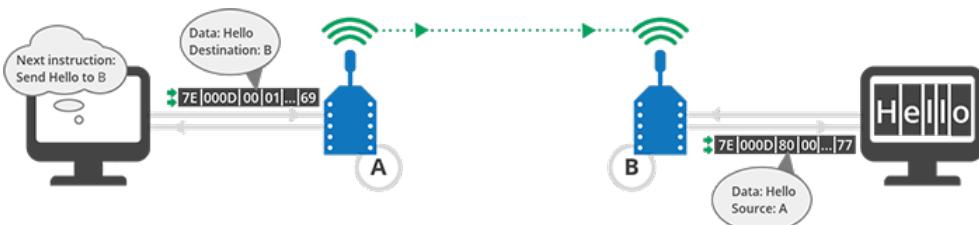
به دلیل این رفتار، دستگاه‌هایی که در حالت شفاف کار می‌کنند محدودیت‌هایی دارند:

- برای خواندن یا نوشتن پیکربندی یک دستگاه در حالت شفاف، ابتدا باید دستگاه را به حالت فرمان تغییر داد.
- اگر دستگاهی نیاز به انتقال پیام به دستگاه‌های مختلف داشته باشد، باید پیکربندی آن برای ایجاد یک مقصد جدید بروز شود. دستگاه باید برای تنظیم مقصد وارد حالت فرمان شود.
- دستگاهی که در حالت شفاف کار می‌کند نمی‌تواند منبع پیام بی‌سیمی را که دریافت کرده شناسایی کند. اگر نیاز به تمایز بین داده‌های دریافتی از دستگاه‌های مختلف باشد، دستگاه‌های فرستنده باید شامل اطلاعات اضافی شناخته شده توسط همه دستگاه‌ها باشند تا بتوان بعداً آنها را استخراج کرد.

حالت API راه بسیار آسان‌تری برای انجام اقدامات ذکر شده ارائه می‌دهد:

- از آنجایی که فریم‌های مختلفی برای اهداف مختلف (مانند پیکربندی و ارتباط) وجود دارد، می‌توان یک دستگاه را بدون وارد شدن به حالت فرمان پیکربندی کرد.
- از آنجایی که مقصد داده بعنوان بخشی از ساختار فریم API گنجانده شده است، می‌توان از حالت API برای انتقال پیام‌ها به چندین دستگاه استفاده کرد.

- فریم API همانطور که در شکل ۹-۲ [۱۲] نشان داده شده است، شامل منبع پیام است. بنابراین تشخیص اینکه داده‌ها از کجا آمده‌اند آسان است.



شکل ۹-۲: ارتباط سریال در حالت API [۱۲]

۴-۲ دروازه

برای دریافت، تجمعیع، قراردادن داده‌ها در قالب مخصوص و ارسال به سرور به یک دستگاه بعنوان دروازه در هر کارخانه نیاز داریم. با توجه به اینکه ممکن است در یک لحظه چند گره انتهایی اطلاعات خود را برای دروازه ارسال کنند و با توجه به امکان نباز به انجام چند کار بصورت همزمان، نیاز به سخت‌افزاری با قابلیت چندرشته‌ای^{۳۶} و منابع کافی برای جمع‌آوری و ارسال داده‌ها داریم. یکی از انتخاب‌های مناسب برای این کار رایانه‌های تک-بورد رزبری‌پای^{۳۷} است.

مدل استفاده شده در این پروژه رزبری‌پای ۴ مدل بی^{۳۸} است که تصویر آن در شکل ۱۰-۲ نشان داده شده است. رزبری‌پای ۴ مدل بی جدیدترین محصول از سری کامپیوترهای محبوب رزبری‌پای است. در مقایسه با نسل قبلی، سرعت پردازنده، عملکرد چندرسانه‌ای، حافظه و اتصال افزایش یافته است، در حالیکه سازگاری با محولات قبلی و مصرف انرژی مشابه حفظ شده است. برای کاربر، این مدل عملکرد قابل مقایسه‌ای با سیستم‌های رایانه شخصی x86 را ارائه می‌دهد. از ویژگی‌های کلیدی این محصول می‌توان به پردازنده چهار هسته‌ای ۶۴ بیتی با کارایی بالا، پشتیبانی از نمایشگر دوگانه با رزولوشن تا 4K از طریق یک جفت پورت micro-HDMI، رم تا ۴ گیگابایت، LAN بی‌سیم ۴/۲ و ۵ گیگاهرتز دو بانده، بلوتوث نسخه ۵ و درگاه USB 3.0 اشاره کرد.^[۱۳]

^{۳۶}Multi Threading

^{۳۷}Raspberry Pi Single-Board Computer

^{۳۸}Raspberry Pi 4 Model B



شکل ۲-۱۰: بورد زبری‌پایی ۴ مدل بی

۵-۲ پایگاه داده‌ی سری زمانی

سری زمانی یک توالی مرتب‌شده از مقادیر یک متغیر در فواصل زمانی مساوی است. بنابراین سری زمانی یک توالی از داده‌های زمان گستته است [۱۴]. داده‌های لرزش جمع‌آوری شده در این پروژه نیز از نوع سری زمانی هستند. جهت ذخیره‌سازی، پردازش و مدیریت بهینه این داده‌ها نیاز به یک پایگاه داده داریم.

InfluxDB یک پایگاه داده سری زمانی بدون طرحواره^{۳۹} منبع باز با اجزای اختیاری منبع بسته است که توسط InfluxData توسعه یافته است. این به زبان برنامه‌نویسی گو^{۴۰} نوشته شده است و برای مدیریت داده‌های سری زمانی بهینه شده است. این یک زبان پرس و جو^{۴۱} مانند SQL را ارائه می‌دهد. نسخه منبع باز که در شکل ۱۱-۲ [۱۵] نشان داده شده است، یک پلتفرم پایگاه داده سری زمانی کامل را با خدمات مختلف از جمله هسته InfluxDB فراهم می‌کند و می‌تواند بر روی ابر و در محل روی یک گره واحد اجرا شود.

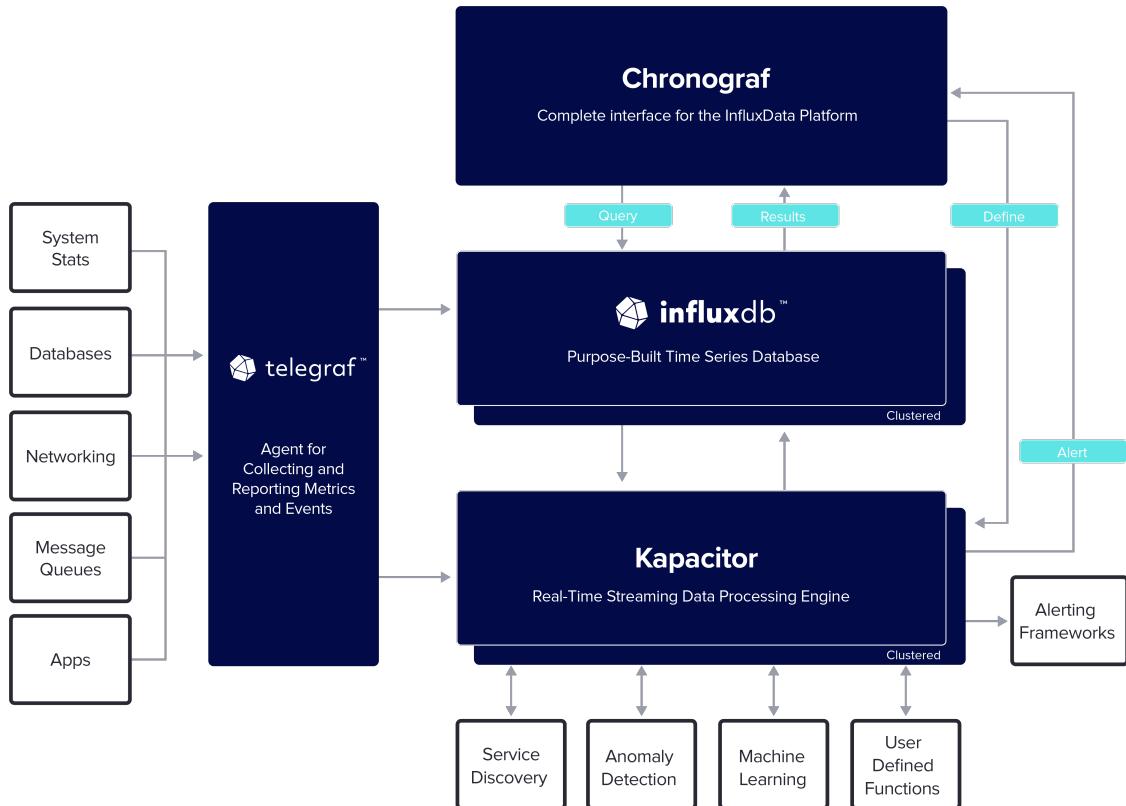
استفاده از پایگاه داده InfluxDB برتری‌هایی نسبت به سایر پایگاه داده‌ها دارد که باعث شد ما از آن برای ذخیره داده‌های لرزش استفاده کنیم. این برتری‌ها عبارتند از:

- طراحی اختصاصی برای داده‌های سری زمانی و عملکرد بهینه در خواندن و نوشتمن این داده‌ها.
- افزودنی‌های رایگان و متعدد مانند HTTP API که باعث تسريع و راحتی توسعه می‌شود.

³⁹Schemaless

⁴⁰Go

⁴¹Query Language



[۱۵] شکل ۲-۱۱: پلتفرم متن باز پایگاه داده سری زمانی InfluxDB

- پشتیبانی از تعداد بالای زبان‌های برنامه‌نویسی.
- پشتیبانی از زبان پرس و جویی مانند SQL بنام InfluxQL که یادگیری و پیاده‌سازی را راحت‌تر می‌کند.

۶-۶ پیش‌پردازش

داده‌های جمع‌آوری شده در دروازه قبل از تحویل به مدل هوش مصنوعی نیاز به برخی پیش‌پردازش‌ها دارند. زبان برنامه‌نویسی انتخابی ما پایتون^{۴۳} است. این زبان به دلیل راحتی در توسعه و وجود کتابخانه‌های زیاد در حوزه هوش مصنوعی انتخاب شده است.

کتابخانه‌ی استفاده شده برای پیش‌پردازش داده‌ها نامپای^{۴۴} نام دارد. نامپای یک کتابخانه منبع باز^{۴۵} توسعه‌یافته توسط جامعه^{۴۶} است که یک شیء آرایه پایتون چندبعدی را به همراه توابع مرتبط با آرایه که

⁴²Python

⁴³NumPy

⁴⁴Open Source

⁴⁵Community-Developed

روی آن کار می‌کنند ارائه می‌دهد. نامپای در پردازش عددی از طریق `ndarray` چندبعدی تخصص دارد، جایی که آرایه‌ها اجازه عملیات عنصر به عنصر^{۴۶} یا پخش^{۴۷} را می‌دهند. در صورت نیاز، جبر خطی را می‌توان بدون از قبل تغییر دادن آرایه‌های نامپای استفاده کرد. علاوه بر این، اندازه آرایه‌ها را می‌توان بصورت پویا تغییر داد. این مسئله نگرانی‌هایی را که معمولاً برنامه‌نویسی سریع در زبان‌های دیگر را سودگم می‌کند، از بین می‌برد^[۱۶، ۱۷].

۷-۲ برنامه‌ی تحت وب

پس از دریافت داده‌های جمع‌آوری شده در دروازه و انجام مراحل پیش‌پردازش لازم، اکنون داده‌ها در اختیار مدل یادگیری ماشینی قرار می‌گیرد تا طول عمر مفید باقیمانده‌ی تجهیزات را پیش‌بینی کند. ما برنامه‌ی وبی را برای نمایش به متخصصان پیاده‌سازی کرده‌ایم تا بتوانند تعمیر و نگهداری بعدی خود را طبق پیش‌بینی برنامه‌ریزی کنند. برای پیاده‌سازی برنامه‌ی تحت وب ما از چارچوب ویو^{۴۸} استفاده کرده‌ایم.

ویو یک چارچوب مترقبی^{۴۹} برای ساخت رابطه‌ای کاربری است. برخلاف سایر چارچوب‌های یکپارچه، ویو از ابتدا به گونه‌ای طراحی شده است که برای رویکرد افزایشی قابل‌پذیرش باشد. هسته‌ی کتابخانه فقط بر روی لایه‌ی نما^{۵۰} متمرکز است و بر احتی انتخاب و ادغام با کتابخانه‌های دیگر یا پروژه‌های موجود است. از سوی دیگر، ویو قادر است برنامه‌های پیچیده تک صفحه‌ای را در ترکیب با ابزارهای نوین و کتابخانه‌های پشتیبان ایجاد کند^[۱۸].

ویو دو ویژگی اصلی دارد:

- تفسیر اعلامی^{۵۱}: ویو HTML استاندارد را با استفاده از نحو `template` گسترش می‌دهد که امکان توصیف صریح خروجی HTML بر اساس وضعیت جاوا اسکریپت^{۵۲} را فراهم می‌کند.

- واکنش‌پذیری^{۵۳}: ویو بطور خودکار وضعیت جاوا اسکریپت را دنبال می‌کند و در صورت تغییر،

⁴⁶Element by Element

⁴⁷Broadcast

⁴⁸Vue Framework

⁴⁹Progressive

⁵⁰View Layer

⁵¹Declarative Rendering

⁵²JavaScript

⁵³Reactivity

مدل سند شیء^{۵۴} را بروزرسانی می‌کند.

ویو چارچوب و اکوسیستمی است که اکثر ویژگی‌های مشترک مورد نیاز در توسعه سمت کاربر را پوشش می‌دهد. اما وب بسیار متنوع است. چیزهایی که در وب می‌سازیم ممکن است از نظر شکل و مقیاس بسیار متفاوت باشند. با توجه به این موضوع، ویو به‌شکلی طراحی شده است که منعطف باشد. اما با وجود انعطاف‌پذیری دانش اصلی در مورد نحوه عملکرد ویو در همه کاربردها یکسان است^[۱۸]. این ویژگی‌ها چارچوب ویو را به چارچوبی کاربردی، کم حجم و آسان برای یادگیری تبدیل می‌کند.

۸-۲ جمع‌بندی و نتیجه‌گیری

در این بخش، به تکنولوژی‌ها، چارچوب‌ها و قطعات استفاده شده در پروژه پرداختیم. هریک از آنها را معرفی کرده و سپس ویژگی‌ها و دلیل انتخابشان را بیان کردیم. ابتدا درباره حسگر استفاده شده برای اندازه‌گیری لرزش صحبت کردیم. سپس به سراغ گره‌های انتهایی و بورد آردوینوی انتخاب شده رفتیم. بعد از آن پروتکل ارتباطی زیگبی، ویژگی‌ها، طرز کار و مازول ایکس‌بی را معرفی کردیم. سپس دروازه و بورد رزبری‌پای استفاده شده را شناختیم. پایگاه داده‌ی InfluxDB که مناسب داده‌های سری زمانی بود را معرفی کردیم. برای پیش‌پردازش داده‌ها از کتابخانه نامپای گفتیم و در انتهای نیز چارچوب ویو که برای پیاده‌سازی برنامه تحت وب استفاده شده بود را مرور کردیم.

⁵⁴Document Object Model

فصل سوم

پیاده‌سازی سیستم

در این قسمت نحوه اجرای پروژه را بطور کامل توضیح خواهیم داد. در هر قسمت ساختار فایل‌ها، نحوه پیاده‌سازی و چالش‌هایی که با آن مواجه بودیم به همراه نحوه حل آنها را توضیح خواهیم داد.

۱-۳ معماری کلی سیستم

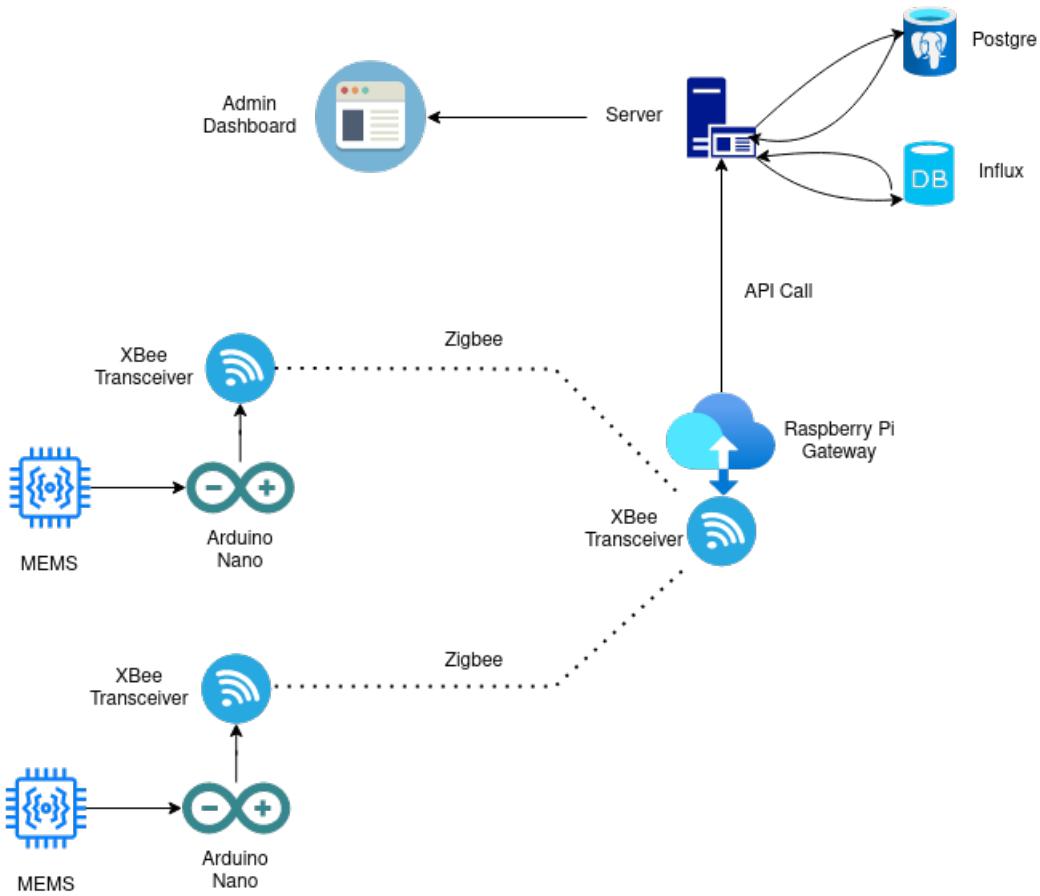
برای درک بهتر این پروژه، نمایی کلی از سیستم و نحوه عملکرد آن را همانطور که در شکل ۱-۳ نشان داده شده است، ارائه خواهیم داد. این پروژه در چندین محل صنعتی مستقر خواهد شد. در هر کارخانه چندین میکروکنترلر آردوینو، با یک سنسور لرزش و یک فرستنده گیرنده زیگبی متصل، روی هر قطعه از تجهیزات نصب شده است. داده‌ها در زمان‌های برنامه‌ریزی شده حس می‌شوند و سپس به دروازه‌ای در کارخانه ارسال می‌شوند. دروازه اطلاعاتی را که از فرستنده‌گیرنده‌های زیگبی می‌آید را جمع‌آوری می‌کند تا زمانی که به یک آستانه‌ی از پیش تعریف شده برسد. سپس دروازه با سرور مرکزی احراز هویت می‌شود و سپس داده‌های جمع‌آوری شده را با پروتکل HTTP به سرور ارسال می‌کند. در سرور مراحل پیش‌پردازش لازم انجام می‌شود و سپس داده‌ها در پایگاه داده‌ی سری زمانی ذخیره می‌شوند. سپس مدل یادگیری ماشین با داده‌های قبلی و جدید اجرا می‌شود تا پیش‌بینی دقیق‌تری درباره طول عمر مفید باقیمانده تجهیزات به ما ارائه دهد. در صورت درخواست، تمام داده‌های تحلیلی و پیش‌بینی‌ها از طریق داشبورد مدیریت قابل دسترسی است. متخصصان می‌توانند از این داده‌ها برای برنامه‌ریزی زمان نگهداری مناسب استفاده کنند.

۲-۳ گره انتهایی و آردوینو

برای پیاده‌سازی گره انتهایی، سه بخش را باید پیاده‌سازی می‌کردیم که عبارتند از:

- خواندن از حسگر و نمونه‌برداری
- تشکیل فریم زیگبی و نوشتن در درگاه سریال
- خوابیدن و بیدارشدن در بازه‌های زمانی مشخص

در ادامه هر بخش را توضیح می‌دهیم.



شکل ۳-۱: نمای کلی سیستم

۱-۲-۳ خواندن از حسگر و نمونه‌برداری

حسگر ADXL345 چندین پارامتر دارد که باید در زمان راهاندازی تنظیم شوند. برای انجام پیکربندی و همچنین خواندن داده‌های حسگرها بدون نیاز به استفاده مستقیم از پروتکل I2C، از کتابخانه^۱ استفاده کردہ‌ایم. یکی از پارامترها محدوده شتاب است که با تابع `setRange` تنظیم می‌شود. محدوده مجاز ۲، ۴، ۸ یا ۱۶ برابر شتاب گرانش زمین است. اما هرچه دامنه بزرگتر شود، داده‌ها دقیق‌تر و کمتری پیدا می‌کنند. از آنجایی که یک قطعه از تجهیزات حتی زمانی که قدیمی باشد با شتاب بالا نمی‌لرزد و برای پیش‌بینی‌های دقیق‌تر به دقت نیاز است، تصمیم گرفتیم که محدوده را روی دو برابر شتاب گرانش زمین تنظیم کنیم. پارامتر دیگر نرخ داده است که باید در زمان راهاندازی با استفاده از تابع `setDataRate` تنظیم شود. نرخ داده برای تنظیم نرخ ارتباط بین حسگر و بورد آردوینو از طریق پروتکل I2C استفاده می‌شود. بنابراین مهم است که نرخ داده با رسانه‌ی ارتباطی سازگار باشد. از آنجایی که اگر نرخ داده بالاتر از نرخی باشد که رسانه قادر به انجام آن است، برخی از داده‌ها از بین می‌روند. بدلیل برخی چالش‌های دیگر

^۱Adafruit_ADXL345_U.h

که در ادامه در مورد آنها صحبت خواهد شد، نرخ را روی ۱۰۰ هرتز تنظیم کردہ‌ایم. برای نمونه‌برداری از داده‌ها در فرکانس نمونه‌برداری مورد نظر، تأخیر نمونه‌برداری برای تأخیر بین هر نمونه حسگر محاسبه می‌شود.

برای هر نمونه، از یک رویداد برای بدست‌آوردن شتاب در سه محور x، y، z استفاده می‌کنیم. سپس داده‌ها در یک آرایه ذخیره می‌شوند تا بعداً قالب‌بندی و با پروتکل زیگبی ارسال شوند. اگر فرمت و ارسال در حین نمونه‌برداری انجام شود، بدلیل تأخیر در فرمت، تشکیل و ارسال فریم‌ها از طریق درگاه سریال، فرکانس نمونه‌برداری صحیح نخواهد بود.

ما چالش دیگری در این شرایط بوجود می‌آید. با توجه به محدودیت حافظه موجود در دستگاه آردوینو نانو، فضای ایجاد آرایه‌ها و ذخیره داده‌ها نیز محدود است. به همین دلیل است که نمی‌توانیم به فرکانس‌های نمونه‌برداری بالا دست پیدا کنیم.

۲-۲-۳ تشكیل فریم زیگبی و نوشتن در درگاه سریال

همانطور که در بخش ۷-۳-۲ گفته شد، در حالت شفاف پیام‌ها به‌شکل مستقیم منتقل می‌شوند اما در حالت API نیاز به تشكیل فریم دارند. ابتدا سراغ استفاده از کتابخانه‌های آماده برای تشكیل و نوشتن فریم بر روی درگاه سریال رفتیم. یکی از آنها کتابخانه xbee-arduino^۲ بود. اما این کتابخانه مشکلات فراوانی داشت که سبب عدم ارسال فریم توسط مازول می‌شد. یکی از این مشکلات محاسبه اشتباه چک‌سام و عدم مطابقت با استاندارد بود. مشکل دیگر نیز در نوشتن بر روی درگاه سریال بود. همه این مشکلات باعث شد تا ما کتابخانه خود را پیاده‌سازی کنیم. اگرچه این پیاده‌سازی کلی نیست و بعضاً برای این پروژه انجام شده است، اما کارکرد مورد انتظار را دارد.

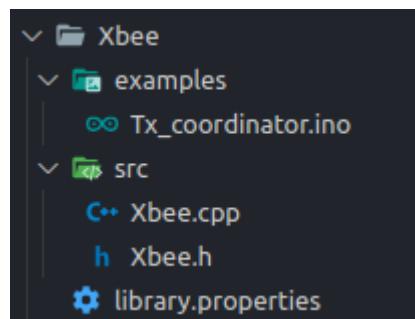
کتابخانه Xbee

ساختار فایل کتابخانه ایکس‌بی در شکل ۲-۳ نشان داده شده است. ساختار طبق استانداردهای آردوینو^۳ برای ایجاد یک کتابخانه است. فایل‌های اصلی در پوشه src قرار دارند، یک فایل هدر که توابع، ورودی‌ها و خروجی‌ها را تعریف می‌کند و یک فایل سی‌پلاس‌پلاس برای پیاده‌سازی و تکمیل آن توابع. در پوشه نمونه‌ها، فایلی با فرمت ino وجود دارد که کاربرد اصلی کتابخانه برای انتقال یک فریم در حالت API را نشان می‌دهد. یک فایل library.properties در ریشه پوشه وجود دارد. این فایل برای تشریح برخی از

²<https://github.com/andrewrapp/xbee-arduino>

³<https://arduino.github.io/arduino-cli/0.33/library-specification/>

ویژگی‌های این کتابخانه از جمله نام، نویسنده، توضیحات، نسخه کتابخانه، معماری‌های سازگار و اینکه این کتابخانه به کدام کتابخانه‌ها وابستگی دارد استفاده می‌شود. این فایل به IDE آردوینو کمک می‌کند تا کتابخانه و وابستگی‌های آن را نصب کند.



شکل ۳-۲: ساختار فایل کتابخانه ایکس‌بی

ساختار فریم API

ساختار کلی فریم API در شکل ۳-۳ [۱۲] نشان داده شده است. فریم با یک بایت جداکننده شروع می‌شود، سپس با ۲ بایت برای نشان‌دادن طول فریم ادامه می‌یابد و با یک بایت چکسام پایان می‌یابد. بایتهای بین طول و فیلد طول مهمترین بایت^۴ و بایت بعدی کم‌اهمیت‌ترین^۵ است. اولین بایت از داده‌های فریم نشان‌دهنده نوع فریم است. چکسام برای کمک به تست یکپارچگی داده‌ها استفاده می‌شود. اگر مقدار چکسام به اشتباه محاسبه شده باشد یا با چکسام واقعی داده‌های درون فریم متفاوت باشد، فریم کنار گذاشته و نادیده گرفته می‌شود.

Start delimiter	Length		Frame data		Checksum
			Frame type	Data	
1	2	3	4	5 6 7 8 9 ... n	n+1
0x7E	MSB	LSB	API frame type	Frame-type-specific data	Single byte

شکل ۳-۳: ساختار کلی فریم API [۱۲]

روش صحیح محاسبه چکسام فریم به شرح زیر است:

۱. تمام بایتهای بسته به استثنای محدودکننده شروع و طول با هم جمع می‌شوند.

⁴Most Significant Byte(MSB)

⁵Least Significant Byte(LSB)

۲. از نتیجه فقط پایین‌ترین ۸ بیت نگه داشته می‌شود.

۳. مقدار بدست‌آمده از ۰xFF کم می‌شود.

فریم درخواست ارسال

فریم‌های API بسته به عملکردشان از چندین نوع فریم پشتیبانی می‌کنند. در این بخش فقط در مورد فریم درخواست ارسال که برای ما مهم است صحبت خواهیم کرد.

بخش‌های مختلف داده‌های فریم درخواست ارسال در [جدول ۱-۳](#) به همراه کاربرد آمده است.

جدول ۳-۱: بخش‌های مختلف داده‌های فریم درخواست ارسال [۱۲]

نام بخش	شماره بایت	نمونه	توضیحات
نوع فریم	۳	0x10	بايت ۰x10 نشان‌دهنده فریم درخواست ارسال است.
شماره فریم	۴	0x01	فریم داده را به گیرنده برای ارسال فریم وضعیت ارسال می‌شناساند. تنظیم کردن با مقدار ° پاسخ را غیرفعال می‌کند.
آدرس ۶۴ بیتی مقصد	۵ تا ۱۲	0x0000000000000000	آدرس ۶۴ بیتی مقصد را مشخص می‌کند. آدرس مقاصد خاص: هماهنگ کننده: 0x0000000000000000 همه‌پخشی ^۶ : 0x000000000000FFFF نامعلوم(اگر آدرس مقصد را ندانیم): 0xFFFFFFFFFFFFFF
آدرس ۱۶ بیتی مقصد	۵ تا ۱۲	0x0000	آدرس ۱۶ بیتی مقصد را مشخص می‌کند. آدرس مقاصد خاص: هماهنگ کننده: 0x0000 نامعلوم یا همه‌پخشی: 0xFFFF
شعاع پخش	۱۵	0x00	حداکثر تعداد پرش‌هایی که انتقال همه‌پخشی می‌تواند پخش شود را تنظیم می‌کند. اگر روی ° تنظیم شود، شعاع پخش روی حداکثر مقدار پرش تنظیم می‌شود.
انتخاب‌ها	۱۶	0x00	گرینه‌های انتقال پشتیبانی شده: غیرفعال کردن تلاش ارسال مجدد - 0x01 فعال کردن رمزگذاری APS(با این کار حداکثر بایت‌های داده ارسالی تا ۴ بایت کاهش می‌یابد) 0x20 - استفاده از مهلت زمان طولانی برای ارسال - 0x40
داده ارسالی	۱۷ به بعد	0x...	تا ۲۵۵ بایت داده ارسالی برای مقصد

داده ارسالی

برای استفاده بهینه از فضای پیام در هر فریم، تصمیم گرفتیم ارتعاشات حسگر را به صورت زیر ارسال کنیم:

- هر داده با دقت ۳ رقم اعشار ارسال می‌شود.
- برای جداسازی ارتعاش بر اساس محور در پیام ارسالی، از حروف x، y و z استفاده نمی‌کنیم.
- اولین بایت همیشه شناسه اندازه‌گیری را نشان می‌دهد. پس از آن پنج بایت اول نشان‌دهنده محور ایکس، پنج بایت بعدی نشان‌دهنده محور وای و پنج بایت بعدی نشان‌دهنده محور زد است. هر داده در پنج بایت نمایش داده می‌شود، برای مثال عدد ۳/۴۵۲ بصورت {’۲’، ’۵’، ’۴’، ’۳’، ’۲’} نمایش داده می‌شود.

در سمت گیرنده، داده‌ها باید به حالت اولیه تبدیل شوند.

فایل Xbee.cpp و توابع مهم

برای تنظیم آدرس مقصد برای هر فریم کلاس XbeeDestAddress را تعریف کردہ‌ایم. این کلاس شامل فیلد ۶۴ بیتی و ۱۶ بیتی برای آدرس است. با توجه به اینکه به آرایه‌ای از بایت‌ها برای تشکیل فریم نیاز داریم، توابعی متناظر برای گرفتن هر یک از فیلدها نیز نوشته شده است.

برای تشکیل فریم درخواست انتقال کلاس XbeeRequest تعریف شده است. تابع constructFrame برای ایجاد فریم با استفاده از شناسه فریم و داده مورد نظر نوشته شده است. این تابع فریم را طبق بخش ۲-۲-۳^۲ ایجاد کرده و فریم تشکیل شده برگردانده می‌شود. با استفاده از تابع writeFrameToSerial نیز می‌توان فریم تشکیل شده را بر روی درگاه سریال دلخواه نوشت.

۳-۲-۳ خوابیدن و بیدارشدن در بازه‌های زمانی مشخص

برای کاهش مصرف انرژی، حسگر تنها در زمان‌های مشخص لرزش را احساس می‌کند. در سایر زمان‌ها بورد آردوینو برای کاهش مصرف انرژی به خواب می‌رود. برای این کار از کتابخانه LowPower.h استفاده می‌کنیم. با استفاده از تابع powerDown آردوینو به خواب می‌رود. برای بیدارشدن در زمان مشخص، آردوینو از زمان‌بند داخلی خود^۴ استفاده می‌کند. اما این تایмер بعد از ۸ ثانیه سرریز شده و بورد بیدار

⁷Watchdog Timer

می‌شود. برای زمان‌های بیشتر باید به محض بیدارشدن مجدد تا رسیدن به زمان مورد نظر، آن را مجدداً به خواب ببریم. این کار در تابع longSleep انجام شده است.

مراجع و مراجع

- [1] Zhao, Jingyi, Gao, Chunhai, and Tang, Tao. A review of sustainable maintenance strategies for single component and multicomponent equipment. *Sustainability*, 14(5):2992, 2022.
- [2] Tinga, Tiedo. Application of physical failure models to enable usage and load based maintenance. *Reliability engineering & system safety*, 95(10):1061–1075, 2010.
- [3] Wu, Sze-jung, Gebraeel, Nagi, Lawley, Mark A, and Yih, Yuehwern. A neural network integrated decision support system for condition-based optimal predictive maintenance policy. *IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics-Part A: Systems and Humans*, 37(2):226–236, 2007.
- [4] Kaiser, Kevin A and Gebraeel, Nagi Z. Predictive maintenance management using sensor-based degradation models. *IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics-Part A: Systems and Humans*, 39(4):840–849, 2009.
- [5] Jung, Deokwoo, Zhang, Zhenjie, and Winslett, Marianne. Vibration analysis for iot enabled predictive maintenance. in *2017 ieee 33rd international conference on data engineering (icde)*, pp. 1271–1282. IEEE, 2017.
- [6] Carlsson, Anders, Kuzminykh, Ievgeniiia, Franksson, Robin, and Liljegren, Alexander. Measuring a lora network: Performance, possibilities and limitations. in *Internet of Things, Smart Spaces, and Next Generation Networks and Systems: 18th International*

- Conference, NEW2AN 2018, and 11th Conference, ruSMART 2018, St. Petersburg, Russia, August 27–29, 2018, Proceedings 18*, pp. 116–128. Springer, 2018.
- [7] Tabbane, Sami. IoT systems overview. *International Telecommunication Union*, 2017.
- [8] Ramya, C Muthu, Shanmugaraj, Madasamy, and Prabakaran, R. Study on zigbee technology. in *2011 3rd international conference on electronics computer technology*, vol. 6, pp. 297–301. IEEE, 2011.
- [9] Gislason, Drew. *Zigbee wireless networking*. Newnes, 2008.
- [10] Song, SM and Yao, WJ. Research on the application value of wireless mesh network in power equipment of the upiot. in *Journal of Physics: Conference Series*, vol. 1346, p. 012046. IOP Publishing, 2019.
- [11] Salih, Mohammed A Abdala& Alaa Mohammed. Design and performance analysis of building monitoring system with wireless sensor networks. *Iraqi Journal of Science*, 53(4):1097–1102, 2012.
- [12] International, Digi. Xbee zigbee guide. <https://www.digi.com/resources/documentation/Digidocs/90001942-13/Default.htm>, 2022.
- [13] Raspberry pi datasheet. <https://datasheets.raspberrypi.com/rpi4/raspberry-pi-4-product-brief.pdf>.
- [14] Naqvi, Syeda Noor Zehra, Yfantidou, Sofia, and Zimányi, Esteban. Time series databases and influxdb. *Studienarbeit, Université Libre de Bruxelles*, 12, 2017.
- [15] Influxdb. <https://www.influxdata.com/time-series-platform/>, Jun 2023.
- [16] Bressert, Eli. Scipy and numpy: an overview for developers. 2012.
- [17] Harris, Charles R, Millman, K Jarrod, Van Der Walt, Stéfan J, Gommers, Ralf, Virtanen, Pauli, Cournapeau, David, Wieser, Eric, Taylor, Julian, Berg, Sebastian, Smith, Nathaniel J, et al. Array programming with numpy. *Nature*, 585(7825):357–362, 2020.

[18] Vue.js. <https://vuejs.org/guide/introduction.html>.

پیوست

موضوعات مرتبط با متن گزارش پایان نامه که در یکی از گروههای زیر قرار می‌گیرد، در بخش پیوستها آورده شوند:

۱. اثبات‌های ریاضی یا عملیات ریاضی طولانی.
۲. داده و اطلاعات نمونه (های) مورد مطالعه (Case Study) چنانچه طولانی باشد.
۳. نتایج کارهای دیگران چنانچه نیاز به تفصیل باشد.
۴. مجموعه تعاریف متغیرها و پارامترها، چنانچه طولانی بوده و در متن به انجام نرسیده باشد.

کد میپل

```
with(DifferentialGeometry):  
with(Tensor):  
  
DGsetup([x, y, z], M)  
frame name: M  
a := evalDG(D_x)  
D_x  
b := evalDG(-2 y z D_x+2 x D_y/z^3-D_z/z^2)
```

واژه‌نامه‌ی فارسی به انگلیسی

حاصل ضرب دکارتی	آ
خ	Scalar
Automorphism	ب
د	Lift
Degree	پ
ر	Invariant
microprocessor	ت
ز	Correspondence
Submodule	ث
س	ثبت‌ساز
Character	ج
ص	Permutation
Faithful	چ
ض	Polynomial

Connected	همبند	Inner product	ضرب داخلی	ط
Edge	یال	Loop	طوقه	ظ
		Valency	ظرفیت	ع
		Nonadjacency	عدم مجاورت	ف
		Vector space	فضای برداری	ک
		Complete reducibility	کاملاً تحویل پذیر	گ
		Graph	گراف	م
		Permutation matrix	ماتریس جایگشتی	ن
		Disconnected	ناهمبند	و
		Invertible	وارون پذیر	ه

واژه‌نامه‌ی انگلیسی به فارسی

A	Homomorphism	همریختی
Automorphism	خودریختی	I
B	Invariant	پایا
Bijection	دوسویی	L
C	Lift	بالابر
Cycle group	گروه دوری	M
D	Module	مدول
Degree	درجه	N
E	Natural map	نگاشت طبیعی
Edge	یال	O
F	One to One	یک به یک
Function	تابع	P
G	Permutation group	گروه جایگشتی
Group	گروه	Q
H		

Quotient graph	گراف خارج‌قسمتی	Trivial character	سرشت بدیهی
R		U	
Reducible	تحویل پذیر	Unique	منحصربفرد
S		V	
Sequence	دنباله		
T		Vector space	فضای برداری

Abstract

This page is accurate translation from Persian abstract into English.

Key Words:

Write a 3 to 5 KeyWords is essential. Example: AUT, M.Sc., Ph. D,..