



دانشگاه صنعتی امیرکبیر
(پلی تکنیک تهران)
دانشکده مهندسی کامپیووتر

پایان نامه کارشناسی

پیاده‌سازی شبکه ارتباطی LoRaWAN و ارزیابی مصرف انرژی و نرخ داده آن در یک محیط شهری

نگارش
امیررضا غفوری

استاد راهنما
دکتر مهدی راستی

شهریور ۱۴۰۰

بِسْمِ اللّٰهِ الرَّحْمٰنِ الرَّحِيْمِ

به نام خدا

تاریخ:

تعهدنامه اصالت اثر



اینجانب امیررضا غفوری متعهد می‌شوم که مطالب مندرج در این پایان نامه حاصل کار پژوهشی اینجانب تحت نظرارت و راهنمایی استادی 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 پایان نامه 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 پایان نامه متعلق به دانشگاه صنعتی امیرکبیر می‌باشد. هرگونه استفاده از نتایج علمی و عملی، واگذاری اطلاعات به دیگران یا چاپ و تکثیر، نسخه‌برداری، ترجمه و اقتباس از این پایان نامه بدون موافقت کتبی دانشگاه صنعتی امیرکبیر ممنوع است. نقل مطالب با ذکر مأخذ بلامانع است.

در صفحه تعهدنامه اصالت اثر، در قسمت بالا سمت چپ، تاریخ دفاع خود را جایگزین تاریخ نوشته شده کنید.

همچنین در صفحه تعهدنامه اصالت اثر، در خط اول، نام و نام خانوادگی خود را به صورت کامل با نام و نام خانوادگی نمونه، جایگزین کنید. در انتهای متن تعهد، در قسمت امضا نیز باید نام و نام خانوادگی کامل خود را وارد نماید.

امیررضا غفوری

امضا

پاسکزاری

بدینوسیله مراتب قدردانی و امتنان خود را خدمت،
استاد گران قدر جناب آقای دکتر مهدی راستی که در کمال سعه صدر، با حسن خلق و فروتنی، رهنمون
من شده‌اند، جناب آقای مهندس بابکی که در راه انجام این پروژه با در اختیار گذاشتن تجربیات خود مرا
یاری کردند، و همچنین از پدر و مادر عزیزم که همواره مشوق و پشتیبان بندۀ در راه کسب علم و دانش
بوده‌اند،
ابراز و از تمامی زحمات آنان تشکر می‌نمایم.

امیر رضا غفوری

۱۴۰۰
شهریور

چکیده

فناوری شبکه LoRaWAN یکی از فناوری‌های شبکه‌های دوربرد با توان کم (LPWAN) است که دارای برد بالا و انرژی مصرفی پایینی است. این فناوری از ۴ قسمت اصلی شامل دستگاه انتهایی مبتنی بر LoRa، دروازه (Gateway)، سرور شبکه و سرور کاربرد تشکیل شده است. در این پروژه یک زیرساخت برای شبکه LoRaWAN طراحی و پیاده‌سازی شده است و سپس مورد ارزیابی قرار گرفته است. برای پیاده‌سازی این زیرساخت ابتدا ۵ دستگاه انتهایی با استفاده از ماژول رادیویی LoRa RF96 و Arduino pro mini بر روی یک PCB، و یک باتری قابل شارژ ۱۰۰۰ میلی-آمپر ساعتی طراحی و ساخته شده است. پس از آن ۳ دروازه با استفاده از فرستنده-گیرنده‌های ۸ کاناله RAK831 بر روی ۳ مینی-کامپیوتر Raspberry pi طراحی و پیکربندی شده است. در نهایت برای بخش سرور شبکه و سرور کاربرد از پلتفرم TTN استفاده شده است. سپس برای ارزیابی شبکه دو دسته سناریو کلی شامل سناریوهای متحرک و سناریوهای ثابت طراحی شده و بر روی نقشه Google Map با مشخص کردن محل قرارگیری دروازه‌ها نمایش داده شده است. در سناریوها موقعیت‌هایی در محدوده‌های ۰.۵، ۱، ۲ و ۵ کیلومتری دروازه‌ها جهت انجام آزمایش‌های ثابت و ۳ مسیر مختلف برای انجام آزمایش‌های متحرک در نظر گرفته شده. برای ارزیابی معیارهایی چون نرخ بسته‌های دریافتی نسبت به بسته‌های ارسالی، قدرت سیگنال‌های دریافتی و نسبت سیگنال به نویز، در فواصل مختلف برای سناریوهای ثابت و با سرعت‌های مختلف برای سناریوهای متحرک مورد بررسی قرار گرفته. نتایج به دست آمده نشان داد که شبکه LoRaWAN دارای نرخ ارسال موفق ۹۰٪ در فواصل زیر ۲ کیلومتر و ۶۰٪ برای فواصل بین ۲ تا ۳ کیلومتر می‌باشد (تا فاصله ۳.۱ کیلومتر برای دروازه شبکه داده ارسال شد). همچنین نرخ ارسال موفق برای سرعت‌های ۱۰ تا ۴۰ کیلومتر از ۶۰٪ تا ۱۰۰٪ اندازه‌گیری گردید. در نهایت ارزیابی انرژی مصرفی شبکه نشان داد که متوسط طول عمر (باتری) یک دستگاه انتهایی کلاس A، ۸ سال است.

واژه‌های کلیدی:

شبکه LoRaWAN، پیاده‌سازی LoRaWAN، ارزیابی LoRaWAN، نرخ ارسال موفق، مصرف انرژی

صفحه

فهرست مطالب

۱	چکیده.....
۲	فصل اول مقدمه.....
۳	۱- کلیات پژوهش.....
۴	۲- ساختار پایان نامه.....
۵	
۶	فصل دوم مفاهیم اینترنت اشیاء.....
۷	۱- لایه ادراک (دستگاه انتهایی).....
۸	۲- لایه شبکه.....
۹	۳- فناوری های شبکه دوربرد با توان کم.....
۱۰	۴- لایه پلتفرم یا سکو.....
۱۱	۵- لایه کاربرد.....
۱۲	جمع بندی.....
۱۳	
۱۴	
۱۵	
۱۶	
۱۷	
۱۸	
۱۹	فصل سوم فناوری شبکه LoRaWAN.....
۲۰	۱- LoRa و LoRaWAN چیست؟.....
۲۱	۲- مزایای فناوری شبکه LoRaWAN.....
۲۲	۳- مدل‌سیون رادیویی و LoRa.....
۲۳	۴- مبانی شبکه LoRaWAN.....
۲۴	۱- اجزای شبکه LoRaWAN: معرفی.....
۲۵	۲- دستگاه انتهایی مبتنی بر LoRa.....
۲۶	۳- دروازه LoRaWAN.....
۲۷	۴- سرور شبکه LoRaWAN.....
۲۸	۵- سرور کاربرد LoRaWAN.....
۲۹	۶- سرور پیوست LoRaWAN.....
۳۰	۷- اجزاء شبکه LoRaWAN: راندازی دستگاه انتهایی.....
۳۱	۸- اجزاء شبکه LoRaWAN: امنیت.....
۳۲	۹- روش پیوست اجزای شبکه LoRaWAN.....
۳۳	۱۰- دستگاه انتهایی کلاس A.....
۳۴	۱۱- دستگاه انتهایی کلاس B.....
۳۵	۱۲- دستگاه انتهایی کلاس C.....
۳۶	
۳۷	
۳۸	
۳۹	
۴۰	
۴۱	
۴۲	
۴۳	
۴۴	
۴۵	
۴۶	
۴۷	
۴۸	
۴۹	
۵۰	
۵۱	

۵۲	جمع بندی
۵۴	فصل چهارم پیاده‌سازی زیرساخت شبکه LoRaWAN
۵۵	۱-۴ پیاده‌سازی دستگاه انتهایی شبکه LoRaWAN
۵۶	۱-۱-۴ نسخه اولیه دستگاه انتهایی مبتنی بر LoRa
۶۱	۲-۱-۴ نسخه دوم دستگاه انتهایی مبتنی بر LoRa
۶۸	۳-۱-۴ راه اندازی دستگاه انتهایی
۷۰	۴-۴ پیاده‌سازی دروازه شبکه LoRaWAN
۷۲	۱-۲-۴ دروازه تک کاناله LoRaWAN
۷۸	۲-۲-۴ پیاده‌سازی دروازه چند کاناله LoRaWAN
۸۳	۳-۴ راه اندازی سرور شبکه و سرور کاربرد
۸۷	۴-۴ بررسی عملکرد انتهای-به-انتهایی شبکه پیاده شده
۸۸	جمع بندی
۹۰	فصل پنجم ارزیابی شبکه LoRaWAN
۹۱	۱-۵ تنظیم پارامترهای دستگاه‌های انتهایی
۹۶	۲-۵ تعریف سناریوهای ارزیابی
۱۰۴	۱-۲-۵ تعریف سناریوهای ثابت
۱۰۶	۲-۲-۵ تعریف سناریوهای متحرک
۱۰۸	۳-۵ آزمایش‌ها و نتایج ارزیابی شبکه LoRaWAN
۱۰۸	۱-۳-۵ انجام آزمایش‌های سناریوهای ثابت
۱۱۶	۲-۳-۵ نتایج ارزیابی شبکه در سناریوهای ثابت
۱۲۵	۳-۳-۵ انجام آزمایش‌های سناریوهای متحرک
۱۳۲	۴-۳-۵ نتایج ارزیابی شبکه در سناریوهای متحرک
۱۳۴	۵-۳-۵ ارزیابی انرژی مصرفی شبکه
۱۳۹	جمع بندی
۱۴۰	فصل ششم جمع‌بندی، نتیجه‌گیری و پیشنهادات
۱۴۱	۱-۶ جمع‌بندی و نتیجه‌گیری
۱۴۲	۲-۶ پیشنهادات
۱۴۴	منابع و مراجع
۱۴۸	Abstract

صفحه

فهرست اشکال

..... ۸ شکل ۱-۲ مدل معماری ۳ لایه‌ای اینترنت اشیاء [21]
..... ۸ شکل ۲-۲ مدل معماری ۴ لایه‌ای اینترنت اشیاء [23]
..... ۹ شکل ۳-۲ مدل معماری ۷ لایه‌ای سیسکو برای اینترنت اشیاء [22]
..... ۱۰ شکل ۴-۲ دستگاه انتهایی (لایه ادراک) در اینترنت اشیاء [24]
..... ۱۱ شکل ۵-۲ کشاورزی هوشمند با استفاده از اینترنت اشیاء [25]
..... ۱۲ شکل ۶-۲ دسته‌بندی شبکه‌های بی‌سیم از نظر برد و پوشش [26]
..... ۱۲ شکل ۷-۲ دسته‌بندی شبکه‌های بی‌سیم از نظر انرژی مصرفی، هزینه، نرخ داده و برد [26]
..... ۱۷ شکل ۸-۲ سرویس‌هایی که لایه پلتفرم ارائه میدهد [27]

..... ۲۱ شکل ۱-۳ توبولوژی فناوری شبکه LoRaWAN [28]
..... ۲۲ شکل ۲-۳ مقایسه فناوری شبکه LoRaWAN با فناوری‌های شبکه دیگر اینترنت اشیاء [14]
..... ۲۲ شکل ۳-۳ مزایای فناوری شبکه LoRaWAN [14]
..... ۲۶ شکل ۴-۳ بررسی لایه‌بندی شبکه LoRaWAN بر حسب مدل ۷ لایه‌ای OSI [14]
..... ۲۷ شکل ۵-۳ تغییر فاز سیگنال حامل در سیستم DSSS [14]
..... ۲۸ شکل ۶-۳ مدل‌سازی LoRa با استفاده از CSS [14]
..... ۳۲ شکل ۷-۳ مصالحه بین عامل گسترش، انرژی مصرفی و برد سیگنال در فناوری LoRaWAN [29]
..... ۳۳ شکل ۸-۳ پشته پروتکل LoRa [14]
..... ۳۴ شکل ۹-۳ معماری شبکه LoRaWAN [14]
..... ۳۵ شکل ۱۰-۳ دستگاه انتهایی در معماری LoRaWAN [14]
..... ۳۶ شکل ۱۱-۳ دستگاه انتهایی مبتنی بر فناوری LoRa و Arduino Uno [11]
..... ۳۷ شکل ۱۲-۳ دروازه در معماری LoRaWAN [14]
..... ۳۷ شکل ۱۳-۳ دریافت داده‌های ارسال شده از دستگاه‌های انتهایی توسط چند دروازه [14]
..... ۳۹ شکل ۱۴-۳ سرور شبکه در معماری LoRaWAN [14]
..... ۴۰ شکل ۱۵-۳ سرور کاربرد در معماری LoRaWAN [14]
..... ۴۱ شکل ۱۶-۳ سرور پیوست در معماری LoRaWAN [14]
..... ۴۴ شکل ۱۷-۳ کلیدهای امنیتی ساخته شده در رویه پیوست [14]
..... ۴۵ شکل ۱۸-۳ ارسال پیام درخواست پیوست به سرور پیوست توسط دستگاه انتهایی [14]
..... ۴۵ شکل ۱۹-۳ ارسال پیام پذیرش پیوست توسط سرور پیوست به دستگاه انتهایی [14]
..... ۴۶ شکل ۲۰-۳ اشتراک گذاری کلید جلسه شبکه و کلید جلسه کاربرد به سرور شبکه و سرور کاربرد توسط سرور پیوست [14]

شکل ۲۱-۳ رمزگذاری دو لایه‌ای در فناوری LoRaWAN [14]	۴۷
شکل ۲۲-۳ نحوه عملکرد دریافت دستگاه انتهایی کلاس A [14]	۴۸
شکل ۲۳-۳ دستگاه کلاس A زمانی که در پنجره دریافت دادهای دریافت نمی‌کند [14]	۴۹
شکل ۲۴-۳ دستگاه کلاس A زمانی که در پنجره اول دریافت داده دریافت می‌کند [14]	۴۹
شکل ۲۵-۳ دستگاه کلاس A زمانی که در پنجره دریافت دوم داده دریافت می‌کند [14]	۴۹
شکل ۲۶-۳ فرآیند Beaconing در دستگاه‌های انتهایی کلاس B [14]	۵۰
شکل ۲۷-۳ دورهای برای همگام‌سازی دستگاه‌های انتهایی [14]	۵۱
شکل ۲۸-۳ عملکرد دریافت دستگاه انتهایی کلاس C [14]	۵۲
 شکل ۱-۴ برد Arduino Uno	۵۶
شکل ۲-۴ ماژول رادیویی Hope RF96	۵۶
شکل ۳-۴ نقشه اتصالات برد Arduino به ماژول رادیویی RF96 [16]	۵۸
شکل ۴-۴ نسخه اولیه دستگاه انتهایی مبتنی بر LoRa	۵۸
شکل ۵-۴ تغییرات لازم در فایل config.h از کتابخانه LMIC	۵۹
شکل ۶-۴ ارسال بسته از نسخه اولیه دستگاه انتهایی و دریافت آن در دروازه و سرور شبکه	۶۰
شکل ۷-۴ PCB چاپ شده برای دستگاه انتهایی نسخه دوم	۶۲
شکل ۸-۴ بررسی جریان مصرفی بردۀای آردوینو [30]	۶۳
شکل ۹-۴ مقایسه ابعاد برد Arduino Uno و Arduino Pro mini	۶۳
شکل ۱۰-۴ برد Arduino Pro Mini در سمت راست و ماژول رادیویی RF96 در سمت چپ	۶۴
شکل ۱۱-۴ باتری قابل شارژ Sonikcell با ظرفیت ۱۰۰۰ میلی آمپر ساعت (سمت راست) و ۲۰۰۰ میلی آمپر ساعت (سمت چپ)	۶۴
شکل ۱۲-۴ قطعات ماژول تغذیه	۶۵
شکل ۱۳-۴ ماژول تغذیه ۱۰۰۰ میلی آمپر ساعت	۶۵
شکل ۱۴-۴ آتن‌های ۹۱۵ مگاهرتز در سایز کوچک و بزرگ	۶۶
شکل ۱۵-۴ دستگاه انتهایی نسخه دوم	۶۶
شکل ۱۶-۴ دستگاه انتهایی نسخه دوم به همراه ماژول تغذیه	۶۷
شکل ۱۷-۴ دستگاه انتهایی نسخه دوم مجهز به GPS	۶۸
شکل ۱۸-۴ کلید جلسه سرور و جلسه کاربرد و آدرس دستگاه در پلتفرم TTN	۶۹
شکل ۱۹-۴ محل قرارگیری کلید جلسه سرور و جلسه کاربرد و آدرس دستگاه در کد Arduino	۷۰
شکل ۲۰-۴ دروازه‌های شبکه LoRaWAN	۷۱
شکل ۲۱-۴ Raspberry pi 3	۷۲
شکل ۲۲-۴ ماژول رادیویی Hope RF96	۷۲
شکل ۲۳-۴ نحوه متصل کردن ماژول رادیویی LoRa به پایه‌های Raspberry pi [31]	۷۳

۷۳	شکل ۲۴-۴ محیط پیکربندی Raspberry pi
۷۴	شکل ۲۵-۴ پنجره رابطهای Raspberry pi
۷۵	شکل ۲۶-۴ فعالسازی رابط جانبی سریال
۷۵	شکل ۲۷-۴ درخواست reboot شدن دستگاه
۷۷	شکل ۲۸-۴ PCB چاپ شده برای اتصال مژول رادیویی RF96 به Raspberry pi
۷۷	شکل ۲۹-۴ دروازه تک کاناله LoRaWAN
۷۸	شکل ۳۰-۴ مژول فرستنده-گیرنده RAK831 کاناله ۸
۷۹	شکل ۳۱-۴ نحوه اتصال پایه‌های Raspberry pi و RAK831
۸۰	شکل ۳۲-۴ دروازه‌های LoRaWAN کاناله پیاده‌سازی شده ۸
۸۱	شکل ۳۳-۴ دروازه‌های LoRaWAN تعریف شده در سرور شبکه
۸۱	شکل ۳۴-۴ آدرس سرور شبکه LoRaWAN
۸۲	شکل ۳۵-۴ وضعیت اتصال دروازه‌ها در سرور شبکه TTN
۸۴	شکل ۳۶-۴ سرور شبکه متن-باز ChirpStack
۸۴	شکل ۳۷-۴ پلتفرم TTN
۸۵	شکل ۳۸-۴ پلتفرم LORIOT
۸۵	شکل ۳۹-۴ اضافه کردن یک کاربرد جدید به سرور کاربرد در پلتفرم TTN
۸۶	شکل ۴۰-۴ سرور کاربرد در پلتفرم TTN
۸۷	شکل ۴۱-۴ ارسال اطلاعات جمع‌آوری شده در دستگاه انتهایی به سرور کاربرد
۸۸	شکل ۴۲-۴ زیرساخت پیاده‌سازی شده برای شبکه LoRaWAN
۹۲	شکل ۵-۱ تنظیم محتوای ارسالی و زمان بین ارسال بسته‌ها در دستگاه انتهایی
۹۳	شکل ۵-۲ تنظیم توان ارسالی و عامل گسترش و پهنه‌ای باند
۹۴	شکل ۵-۳ نرخ داده‌های مختلف با استفاده از ترکیب پهنه‌ای باند و عامل گسترش‌های مختلف [18]
۹۶	شکل ۵-۴ دستگاه‌های انتهایی مورد استفاده در ارزیابی شبکه در بیرون
۹۷	شکل ۵-۵ منطقه ارزیابی در مشهد، همراه با مکان دروازه‌ها
۹۸	شکل ۵-۶ محل قرارگیری و نمای LoRa_Gateway2
۹۹	شکل ۵-۷ تجهیزات شبکه و آنتن دروازه3 LoRa_Gateway3
۹۹	شکل ۵-۸ محل قرارگیری و نمای دروازه3 LoRa_Gateway3
۱۰۰	شکل ۵-۹ تجهیزات شبکه و آنتن دروازه1 LoRa_Gateway1
۱۰۱	شکل ۵-۱۰ محل قرارگیری و نمای دروازه1 LoRa_Gateway1
۱۰۲	شکل ۵-۱۱ دایره‌های فاصله دروازه2 LoRa_Gateway2
۱۰۳	شکل ۵-۱۲ دایره‌های فاصله از دروازه3 LoRa_Gateway3
۱۰۳	شکل ۵-۱۳ دایره‌های فاصله از دروازه1 LoRa_Gateway1

..... ۱۰۴	شکل ۱۴-۵ دایره‌های فاصله از ۳ دروازه LoRaWAN
..... ۱۰۶	شکل ۱۵-۵ موقعیت نقاط انجام آزمایش (رنگ آبی).
..... ۱۰۷	شکل ۱۶-۵ مسیرهای انجام ارزیابی متحرک شبکه LoRaWAN
..... ۱۰۹	شکل ۱۷-۵ محدوده ۱۰۰۰ متری دروازه ۱ و ۳ (نقطه همپوشانی).
..... ۱۰۹	شکل ۱۸-۵ محدوده ۱۰۰۰ متری دروازه ۱ و ۳ (نقطه همپوشانی) روی نقشه.
..... ۱۱۰	شکل ۱۹-۵ بسته‌های دریافت شده در محدوده ۱۰۰۰ متری دروازه ۱ و ۳
..... ۱۱۱	شکل ۲۰-۵ خارج از محدوده ۲۰۰۰ متری دروازه ۱ و ۳
..... ۱۱۱	شکل ۲۱-۵ خارج از محدوده ۲۰۰۰ متری دروازه ۱ و ۳ روی نقشه
..... ۱۱۲	شکل ۲۲-۵ محدوده ۵۰۰ متری دروازه ۱ و ۲۰۰۰ متری دروازه ۳
..... ۱۱۳	شکل ۲۳-۵ محدوده ۵۰۰ متری دروازه ۱ و ۲۰۰۰ متری دروازه ۳ روی نقشه
..... ۱۱۳	شکل ۲۴-۵ دریافت یک بسته در محدوده ۵۰۰ متری دروازه ۱ و ۲۰۰۰ متری دروازه ۳ توسط دروازه ۳
..... ۱۱۴	شکل ۲۵-۵ دریافت بسته با مشخصات بهتر در سرور کاربرد
..... ۱۱۵	شکل ۲۶-۵ ارسال داده برای دروازه شماره ۱ از فاصله ۱۵۰۰ متری آن
..... ۱۱۵	شکل ۲۷-۵ محدوده ۲۰۰۰ متری (فاصله ۱۵۰۰ متری) از دروازه شماره ۳ (بنفس)
..... ۱۱۶	شکل ۲۸-۵ ارسال داده از محدوده ۲۰۰۰ متری (فاصله ۱۵۰۰ متری) از دروازه شماره ۳ (بنفس)
..... ۱۲۰	شکل ۲۹-۵ نمودار قدرت سیگنال دریافتی برای-1-gps
..... ۱۲۰	شکل ۳۰-۵ نمودار نسبت سیگنال به نویز برای-1-gps
..... ۱۲۱	شکل ۳۱-۵ نمودار درصد بسته‌های دریافت شده نسبت به بسته‌های ارسال شده توسط-1-gps
..... ۱۲۲	شکل ۳۲-۵ نمودار قدرت سیگنال دریافتی برای-3-gps
..... ۱۲۲	شکل ۳۳-۵ نمودار نسبت سیگنال به نویز برای-3-gps
..... ۱۲۳	شکل ۳۴-۵ نمودار درصد بسته‌های دریافت شده نسبت به بسته‌های ارسال شده توسط-3-gps
..... ۱۲۴	شکل ۳۵-۵ نمودار قدرت سیگنال دریافتی برای-5-gps
..... ۱۲۴	شکل ۳۶-۵ نمودار نسبت سیگنال به نویز برای-5-gps
..... ۱۲۵	شکل ۳۷-۵ نمودار بسته‌های دریافت شده به ازای هر ۱۰ بسته ارسال شده توسط-5-gps
..... ۱۲۶	شکل ۳۸-۵ مسیر اول ارزیابی متحرک شبکه
..... ۱۲۷	شکل ۳۹-۵ عدم دریافت بسته توسط دروازه شماره ۱ از ۱۵:۴۴:۲۲
..... ۱۲۸	شکل ۴۰-۵ دریافت بسته توسط دروازه شماره ۳ از لحظه ۱۵:۴۵:۳۵
..... ۱۲۸	شکل ۴۱-۵ داده‌های دریافت شده در سرور کاربرد در مسیر ۱
..... ۱۲۹	شکل ۴۲-۵ مسیر دوم ارزیابی متحرک شبکه
..... ۱۳۰	شکل ۴۳-۵ مسیر سوم ارزیابی متحرک شبکه
..... ۱۳۱	شکل ۴۴-۵ تصویر مسیر سوم (بلوار و کیل آباد)
..... ۱۳۱	شکل ۴۵-۵ تصویر مسیر سوم (پل صیاد شیرازی)
..... ۱۳۳	شکل ۴۶-۵ نمودار ارزیابی شبکه بر اساس بسته‌های دریافت شده در حال حرکت

شکل ۴۷-۵ نمودار ارزیابی شبکه بر اساس نسبت بسته‌های دریافت شده به ارسال شده.....	۱۳۴
شکل ۴۸-۵ دستگاه‌های انتهایی برای اندازه‌گیری انرژی مصرفی.....	۱۳۶
شکل ۴۹-۵ پوشاندن دستگاه‌های انتهایی با فویل آلومینیومی.....	۱۳۶
شکل ۵۰-۵ مقایسه طول عمر دستگاه‌های انتهایی به ازای تعداد ارسال‌های متفاوت در روز.....	۱۳۹

صفحه

فهرست جداول

جدول ۱-۲ مروری بر چند فناوری شبکه مورد استفاده در کاربردهای اینترنت اشیاء.....	۱۵
جدول ۱-۳ عامل گسترش های مختلف و مشخصات شبکه برای هر یک از آنها[14].....	۳۰
جدول ۲-۳ مقایسه دو روش راهاندازی دستگاه انتهایی.....	۴۳
جدول ۱-۵ پارامترهای تنظیم شده در دستگاههای انتهایی.....	۹۵
جدول ۲-۵ نتایج ارزیابی دستگاه انتهایی اول با شناسه gps-1.....	۱۱۷
جدول ۳-۵ نتایج ارزیابی دستگاه انتهایی اول با شناسه gps-3.....	۱۱۸
جدول ۴-۵ نتایج ارزیابی دستگاه انتهایی اول با شناسه gps-5 در محدوده دروازه شماره ۲.....	۱۱۹
جدول ۵-۵ طول عمر دستگاههای انتهایی کلاس A به ازای تعداد ارسالهای مختلف در روز به باتری میلی آمپر ساعتی.....	۱۰۰
	۱۳۸

فصل اول

مقدمه

مقدمه

اینترنت اشیاء، بیانگر شبکه‌ای از اشیاء یا چیزها است که به واسطه یک شبکه ارتباطی می‌توانند با یکدیگر و دنیای بیرونی (اینترنت) ارتباط برقرار کنند و به تبادل اطلاعات بپردازنند. پیدایش اینترنت اشیاء دنیای جدیدی را به وجود آورده است که خودکارسازی^۱ و هوشمندسازی در بسیاری از کاربردها را میسر ساخته است، که این امر باعث کاهش هزینه‌ها و تسهیل کارها در این کاربردها می‌شود. وجود شبکه‌ای گسترده از اشیاء و رد و بدل کردن داده‌ها توسط این اشیاء باعث تولید حجم بسیار زیادی از داده‌ها یا به اصطلاح داده‌های حجمی^۲ می‌شود که با تحلیل این داده‌های حجمی می‌توان نتایج ارزشمندی را به دست آورد و با استفاده از آن‌ها به بهینه سازی و تغییر کاربرد ها پرداخت. همانطور که گفته شد، اینترنت اشیاء می‌تواند منجر به هوشمندسازی کاربرد ها بشود و از این کاربردها می‌توان به کشاورزی هوشمند، شهر هوشمند، حمل و نقل هوشمند، انرژی هوشمند، خانه هوشمند و مانند این‌ها اشاره کرد.

معماری اینترنت اشیاء به طور کلی متشکل از ۳ لایه اصلی می‌باشد که شامل لایه ادراک (شیء یا دستگاه انتهایی^۳)، لایه شبکه ارتباطی و لایه کاربرد است که به تفصیل در فصل دوم توضیح داده خواهد شد. علاوه بر این ۳ لایه اصلی در معماری اینترنت اشیاء معمولاً یک لایه دیگر به نام لایه پلتفرم نیز پیاده سازی می‌شود که بین لایه شبکه و لایه کاربرد قرار می‌گیرد و وظیفه آن جمع‌آوری، تحلیل، مصور سازی داده‌ها و همچنین کنترل و مدیریت دستگاه‌های انتهایی است.

دستگاه انتهایی یا گره انتهایی همان سخت‌افزار مجهز به حسگر^۴ یا عملگر^۵ یا هردو می‌باشد که اطلاعاتی را از محیط دریافت و عملی را روی محیط انجام می‌دهد. دریافت و ارسال این اطلاعات توسط لایه بالایی آن، یعنی لایه شبکه انجام می‌شود. سپس این اطلاعات در یک محیط به نام پلتفرم تجمعی شده و تحلیل و پردازش می‌شوند. در ادامه اطلاعات به لایه کاربرد می‌رود و به کاربر نمایش داده می‌شود و یا دستوری

¹ Automation

² Big Data

³ End-device

⁴ Sensor

⁵ Actuator

که کاربرد در لایه کاربرد اعمال می‌کند توسط همین مسیر به دستگاه انتهایی می‌رسد. در این پروژه تمرکز اصلی روی لایه شبکه و پیاده‌سازی و ارزیابی یکی از فناوری‌های لایه شبکه اینترنت اشیاء می‌باشد.

به طور کلی می‌توان از هر فناوری شبکه‌ای برای پیاده‌سازی سیستم مبتنی بر اینترنت اشیاء استفاده کرد، اما نکته اصلی که باید در نظر گرفته شود این است که دستگاه‌های انتهایی در زیرساخت اینترنت اشیاء غالباً باید دارای انرژی مصرفی پایینی باشند و همچنین حجم داده‌هایی که توسط هر گره انتهایی ارسال و دریافت می‌شود معمولاً بسیار کم است. در نتیجه فناوری‌های شبکه جدیدی برای این کاربردها طراحی و ساخته شده‌اند که از مصرف انرژی پایینی برخوردار هستند و همچنین دارای نرخ داده پایینی می‌باشند.

یک دسته از فناوری‌های شبکه که مختص اینترنت اشیاء طراحی شده‌اند، شبکه‌هایی کم توان با بردا^۶ می‌باشند. از جمله معروف ترین فناوری‌های این دسته می‌توان به فناوری NB-IoT، Sigfox^۷ و LoRaWAN^۸ اشاره کرد. شبکه LoRaWAN از چهار جزء اصلی شامل دستگاه انتهایی، دروازه^۹، سرور شبکه^{۱۰} و سرور کاربرد^{۱۱} تشکیل می‌شود. در این پروژه هدف پیاده‌سازی یک زیرساخت برای شبکه LoRaWAN و ارزیابی این شبکه ارزیابی این شبکه در فضای بیرون^{۱۲} در شهر مشهد، که یک محیط نویزی محسوب می‌شود، می‌باشد.

۱-۱ کلیات پروژه

برای پیاده‌سازی زیرساخت شبکه LoRaWAN به طراحی و پیاده‌سازی اجزاء تشکیل دهنده آن می‌پردازیم. ابتدا ۵ دستگاه انتهایی مبتنی بر LoRa طراحی و ساخته می‌شود. برای ساخت دستگاه‌های انتهایی از یک ماژول فرستنده-گیرنده LoRa RF96 و یک میکروکنترلر Arduino pro mini استفاده

⁶ Low-Power Wide Area Network (LPWAN)

⁷ Long Range Wide Area Network

⁸ Gateway

⁹ Network server

¹⁰ Application server

¹¹ Outdoor

¹² Microcontroller

شده است که از طریق PCB طراحی شده به یکدیگر متصل می‌شوند. همچنین یک ماژول تغذیه با باتری قابل شارژ ۱۰۰۰ میلی آمپر ساعتی طراحی شده است که به عنوان منبع تغذیه دستگاه انتهایی مورد استفاده قرار می‌گیرد. سپس ۳ دروازه با استفاده از ماژول‌های فرستنده-گیرنده ۸ کاناله RAK831 و مینی-کامپیوترهای Raspberry pi طراحی و پیکربندی خواهیم کرد. در ادامه به نحوه ساخت و تنظیمات سرور شبکه و سرور کاربرد بر روی پلتفرم TTN (The Things Network) خواهیم پرداخت. با تکمیل مراحل ذکر شده، زیرساخت شبکه LoRaWAN آماده می‌شود و می‌توان آن را مورد ارزیابی قرار داد. برای ارزیابی شبکه، دو دسته سناریو کلی شامل سناریوهای ثابت^{۱۳} و سناریوهای متحرک^{۱۴} را طراحی و تعریف می‌کنیم. برای درک بهتر سناریوها و نحوه انجام آن‌ها از یک نقشه Google map استفاده خواهیم کرد. در این نقشه محل استقرار دروازه‌های شبکه را مشخص کرده و با دایره‌هایی به مرکز این دروازه‌ها، فاصله نقاط مختلف از آن‌ها را مشخص می‌کنیم. سپس با مشخص کردن نقاط انجام سناریوهای ثابت و مسیرهای انجام سناریوهای متحرک نقشه‌ی ارزیابی را تکمیل می‌کنیم. برای سناریوهای ثابت معیارهایی چون نرخ بسته‌های دریافتی نسبت به بسته‌های ارسال شده، نسبت سیگنال به نویز در سیگنال‌های ارسال شده و قدرت سیگنال‌های دریافتی را در فواصل مختلف مورد بررسی قرار می‌دهیم. برای سناریوهای متحرک نیز معیارهای چون نرخ بسته‌های دریافتی نسبت به بسته‌های ارسال شده در سرعت‌های مختلف و نسبت کل بسته‌های دریافت شده به کل بسته‌های ارسال شده در مسیرهای مختلف را مورد ارزیابی قرار خواهیم داد. سناریوهای تعریف شده را توسط ۳ دستگاه انتهایی با تنظیمات مختلف از نظر عامل گسترش، پهنه‌ای باند و توان ارسالی انجام خواهیم داد. همچنین برای ارزیابی انرژی مصرفی شبکه از دو دستگاه انتهایی استفاده خواهیم کرد. این دو دستگاه انتهایی را طوری تنظیم می‌کنیم که یکی از آن‌ها حداکثر انرژی و دیگری حداقل انرژی ممکن را مصرف کند. با اندازه گیری مدت زمان روشن بودن و تعداد بسته‌های ارسال شده توسط این دو دستگاه، انرژی مصرفی شبکه را تخمین می‌زنیم.

پس از تعریف سناریوها به ارزیابی شبکه می‌پردازیم. برای ارزیابی ابتدا دروازه‌ها را در نقاط مشخص شده در نقشه مستقر می‌کنیم. سپس در نقاط مشخص شده برای سناریوهای ثابت قرار گرفته و از طریق ۳ دستگاه انتهایی مختلف برای دروازه‌ها داده ارسال می‌کنیم. پس از انجام سناریوهای ثابت نیز برای سناریو-

¹³ Stationary

¹⁴ Mobile

های متحرک در مسیرهای مشخص شده در نقشه، با استفاده از وسیله نقلیه با سرعت‌های مختلف تردد کرده و با استفاده از دستگاه‌های انتهایی داده ارسال می‌کنیم. سپس نتایج ارزیابی را جمع‌آوری کرده و به تحلیل و نتیجه‌گیری می‌پردازیم. نتیجه گیری‌ها نشان می‌دهد که شبکه LoRaWAN در سناریوهای ثابت دارای نرخ ارسال موفق ۹۰٪ در محدوده ۱ کیلومتری و نرخ ارسال موفق ۶۰٪ در محدوده ۲ تا ۳ کیلومتری است. همچنین در آزمایش‌های انجام شده موفق به ارسال داده از فاصله ۳.۱ کیلومتری دروازه شدیم. همچنین در سناریوهای متحرک نرخ ارسال موفق شبکه در سرعت‌های ۱۰ تا ۴۰ کیلومتر بر ساعت از ۱۰۰٪ تا ۶۰٪ تغییر می‌نماید. نتایج حاصل از ارزیابی انرژی مصرفی نیز نشان می‌دهد که در حالت میانگین و با ارسال تعداد میانگین ۲۰ پیام در روز توسط دستگاه انتهایی کلاس A (جزئیات دستگاه‌ها انتهایی در فصل مربوطه توضیح داده خواهد شد)، می‌تواند طول عمری معادل ۱۰ سال با استفاده از یک باتری ۱۰۰۰ میلی‌آمپر ساعتی داشته باشد (از نظر مدت زمان روشن ماندن).

۲-۱ ساختار پایان‌نامه

در ادامه این پایان‌نامه، در فصل دوم مفاهیم و معماری اینترنت اشیاء توضیح داده خواهد شد، سپس در فصل سوم به طور دقیق‌تر به بررسی شبکه LoRaWAN و اجزاء آن خواهیم پرداخت. در ادامه در فصل چهارم به جزئیات پیاده‌سازی یک زیرساخت اینترنت اشیاء مبتنی بر شبکه LoRaWAN از دستگاه انتهایی تا سرور کاربرد می‌پردازیم. در فصل پنجم شبکه پیاده‌سازی شده را طبق معیارهای ذکر شده در بخش کلیات ارزیابی کرده و در فصل ششم به جمع‌بندی مطالب و ارائه پیشنهادات جهت ادامه کار پرداخته می‌شود.

فصل دوم

مفاهیم اینترنت اشیاء

مفاهیم اینترنت اشیاء

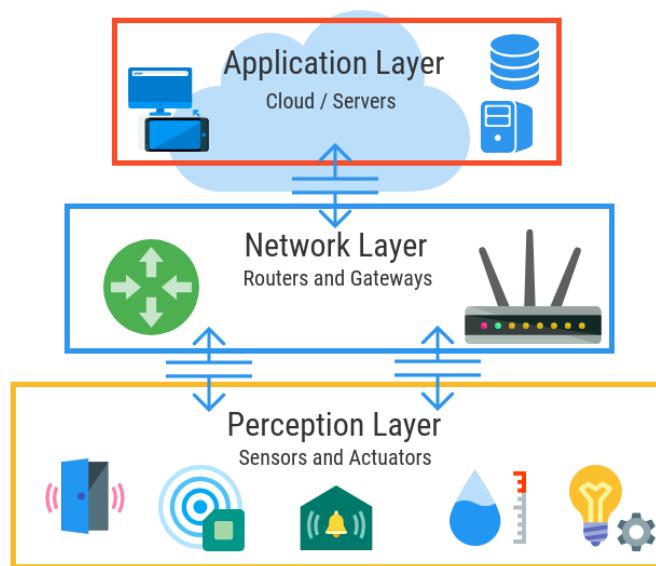
گروه تحقیقاتی Auto-ID در حوالی سال ۲۰۰۰ میلادی از عبارت "اینترنت اشیا" استفاده کرد و بسیاری آن را نخستین استفاده از عبارت اینترنت اشیا می‌دانند؛ با این حال، عبارت اینترنت اشیا نخستین بار توسط ITU در سال ۱۹۹۷ مورد استفاده قرار گرفته است؛ که برای معرفی ایده جهان به هم متصل بیان شده است. مفهوم اینترنت اشیا می‌تواند گستره وسیعی را در برگیرد؛ از سیستمی کوچک که مشتمل بر تعدادی شیء قابل شناسایی و حسگرهای کوچک است تا سیستمی که میلیون‌ها شیء را به یکدیگر متصل می‌نماید و می‌تواند خدمات پیچیده‌ای را ارائه دهد [2]. بدین ترتیب مرجع [1] دو تعریف مجزا از اینترنت اشیا متناسب با ابعاد مسئله ارائه می‌دهد.

معماری اینترنت اشیاء یک معماری لایه‌ای است که هر لایه با لایه‌های بالا و پایین خود در ارتباط است. مدل مرجع و معمول معماری اینترنت اشیاء دارای ۳ لایه اصلی می‌باشد که شامل لایه ادراک (دستگاه انتهایی یا گره انتهایی)، لایه شبکه و لایه کاربرد^{۱۵} است [1].

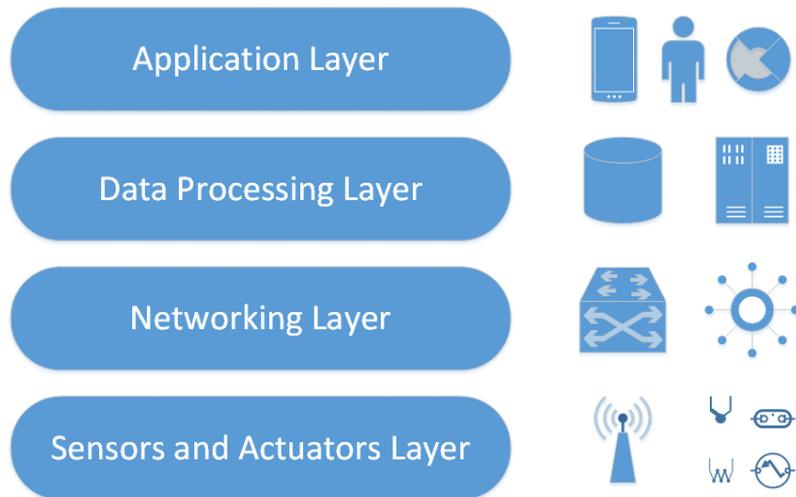
علاوه بر مدل مرجع ۳ لایه‌ای، مدل ۴ لایه‌ای نیز ارائه می‌شود که یک لایه به نام پلتفرم در بین لایه شبکه و لایه کاربرد قرار می‌گیرد و وظیفه آن تجمیع، تحلیل و پردازش داده‌های جمع‌آوری شده است. همچنین برخی شرکت‌های صاحب‌نظر مدل‌های دیگری برای معماری لایه‌ای اینترنت اشیاء ارائه داده‌اند. به عنوان مثال شرکت سیسکو^{۱۶} یک مدل ۷ لایه‌ای ارائه داده است. لازم به ذکر است که مدل ۳ لایه‌ای مبتدی‌ترین معماری برای اینترنت اشیاء می‌باشد و وجود این ۳ لایه برای داشتن یک سیستم مبتنی بر اینترنت اشیاء ضروری است. در شکل‌های ۱-۲، ۲-۲ و ۳-۲ به ترتیب مدل ۳ لایه‌ای، ۴ لایه‌ای و ۷ لایه‌ای معماری اینترنت اشیاء نمایش داده شده‌اند.

^{۱۵} Application

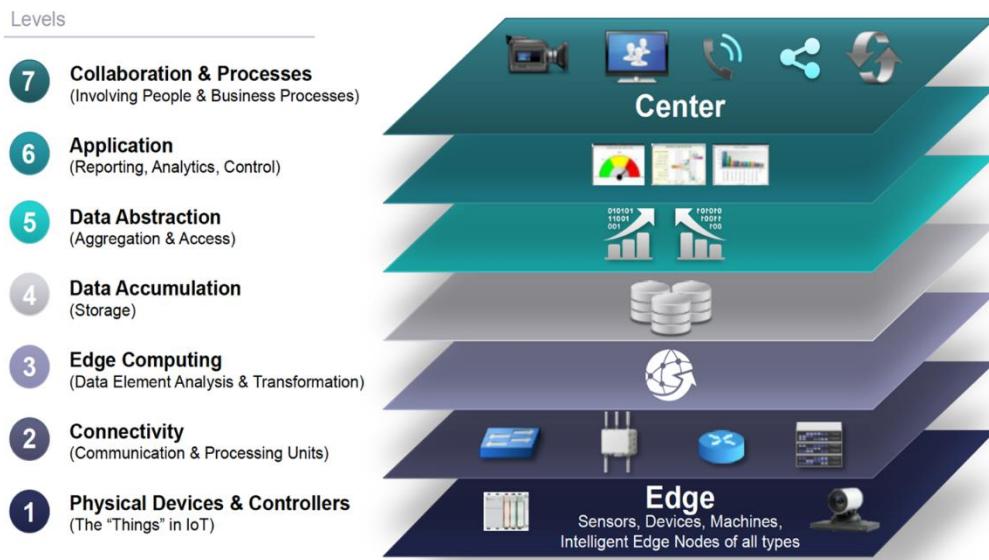
^{۱۶} Cisco



شکل ۱-۲ مدل معماری ۳ لایه‌ای اینترنت اشیاء [21]



شکل ۲-۲ مدل معماری ۴ لایه‌ای اینترنت اشیاء [23]



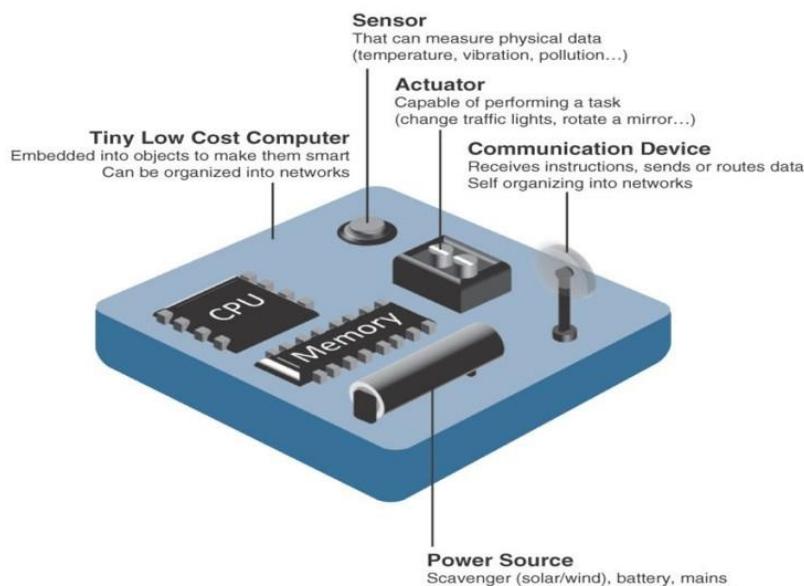
شکل ۲-۳ مدل معماری ۷ لایه‌ای سیسکو برای اینترنت اشیاء [22]

در این پروژه ما از معماری ۴ لایه‌ای استفاده کرده‌ایم و در ادامه به بررسی هر یک از لایه‌های این معماری پردازیم.

۱-۲ لایه ادراک (دستگاه انتهایی)

لایه ادراک یا همان دستگاه انتهایی یا گره انتهایی^{۱۷} در واقع یک دستگاه سخت‌افزاری مت Shank از پردازنده، منبع انرژی، حسگر یا عملگر یا هردو و مازول ارتباطی می‌باشد. وظیفه دستگاه انتهایی جمع‌آوری اطلاعات از محیط توسط حسگر یا انجام یک عمل روی محیط توسط عملگر و یا هردوی این‌ها می‌باشد. وجود پردازنده در دستگاه انتهایی آن را برنامه‌پذیر می‌کند و می‌تواند به واسطه آن دستوراتی را اجرا کند. منبع انرژی برای روشن شدن و کارکردن دستگاه ضروری است و می‌تواند به صورت منبع موقت مثل باتری و یا دائم مثل اتصال به شبکه برق باشد. مازول ارتباطی در دستگاه انتهایی نیز وظیفه انتقال اطلاعات به دستگاه و از دستگاه به بیرون را دارد [24]. در شکل ۴-۲ ساختار یک دستگاه انتهایی را مشاهده می‌کنید.

¹⁷ End-node

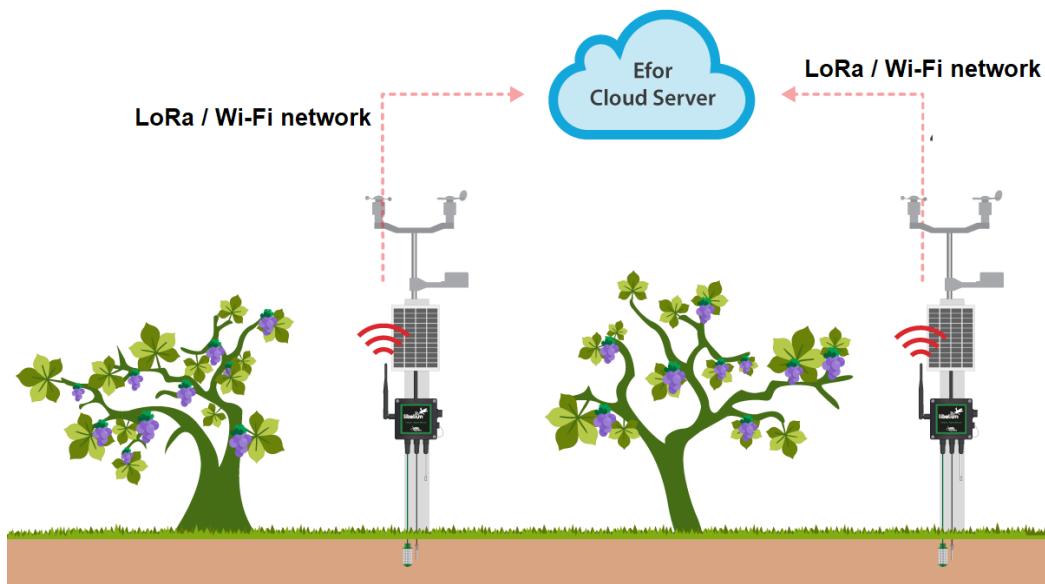


شکل ۴-۲ دستگاه انتهایی (لایه ادراک) در اینترنت اشیاء [24]

برای مثال، یک دستگاه آبیاری هوشمند که در کشاورزی هوشمند مورد استفاده قرار میگیرد را در نظر بگیرید. این دستگاه میتواند برای پردازندۀ از یک برد ساده آردوینو مانند برد آردوینو-پرو-مینی^{۱۸} استفاده کند. حسگر این دستگاه یک حسگر رطوبت سنج میباشد که رطوبت خاک را اندازه‌گیری می‌کند و عملگر روی این دستگاه یک رله برای باز و بسته کردن جریان آب می‌باشد. برای منبع تغذیه این دستگاه میتوان از یک باتری قابل شارژ استفاده کرد و برای مازول ارتباطی آن میتوان از مازول ارتباطی شبکه LoRaWAN استفاده کرد. در مورد فناوری‌های شبکه در فصل بعدی توضیح خواهیم داد. وظیفه این دستگاه این است که در صورت کاهش رطوبت خاک عمل آبیاری زمین را انجام دهد. در نتیجه با جایگذاری دستگاه در مکان‌های مناسب و فواصل مناسب در زمین کشاورزی، میتوان آبیاری زمین را به صورت هوشمند و بهینه انجام داد و در مصرف آب و هزینه‌های آبیاری صرفه‌جویی کرد. علاوه بر انجام عمل آبیاری این دستگاه میتواند اطلاعات دیگری مانند دما و میزان قلیابی بودن خاک را توسط حسگرهایی دیگر از محیط جمع‌آوری کرده و این اطلاعات را توسط مازول ارتباطی به یک سرور مرکزی ارسال کند و با تحلیل این داده‌های در سرور مرکزی به سلامت زمین کشاورزی رسیدگی شود. این تنها یک نمونه خیلی ساده و کوچک از کشاورزی هوشمند می‌باشد که توسط اینترنت اشیاء امکان‌پذیر شده است.

¹⁸ Arduino Pro Mini

در شکل ۲-۵ این مثال از کشاورزی هوشمند را مشاهده می‌کنید.



شکل ۲-۵ کشاورزی هوشمند با استفاده از اینترنت اشیاء [25]

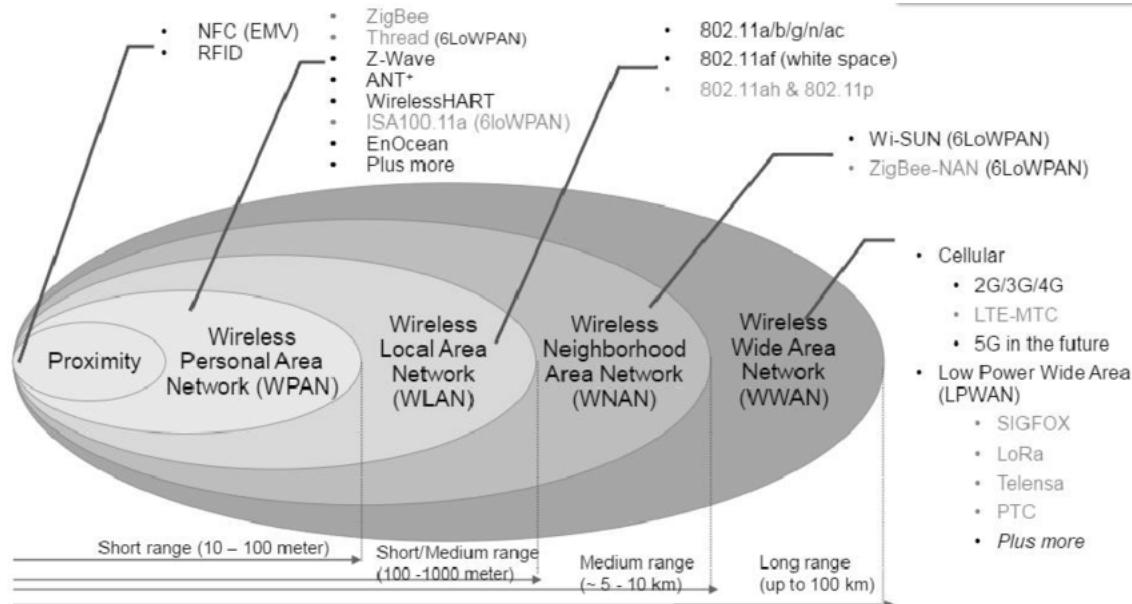
۲-۲ لایه شبکه

همانطور که پیشتر گفته شد، دستگاه انتهایی برای ارتباط با دستگاه‌های دیگر یا سرور مرکزی و یا لایه کاربرد نیاز به یک شبکه ارتباطی^{۱۹} دارد. فناوری‌های شبکه به طور کلی به دو دسته شبکه سیمی^{۲۰} و شبکه بی‌سیم^{۲۱} تقسیم می‌شوند که در کاربردهای اینترنت اشیاء غالباً از شبکه‌های بی‌سیم استفاده می‌شود. فناوری‌های شبکه بی‌سیم را می‌توان از منظرهای مختلفی دسته‌بندی کرد، به عنوان مثال می‌توان آن‌ها را از نظر برد و پوشش شبکه و یا انرژی مصرفی آن‌ها دسته‌بندی کرد. در شکل ۲-۶ و شکل ۲-۷ نیز یک تقسیم‌بندی از نظر نرخ داده و انرژی مصرفی، برد و هزینه انجام شده است.

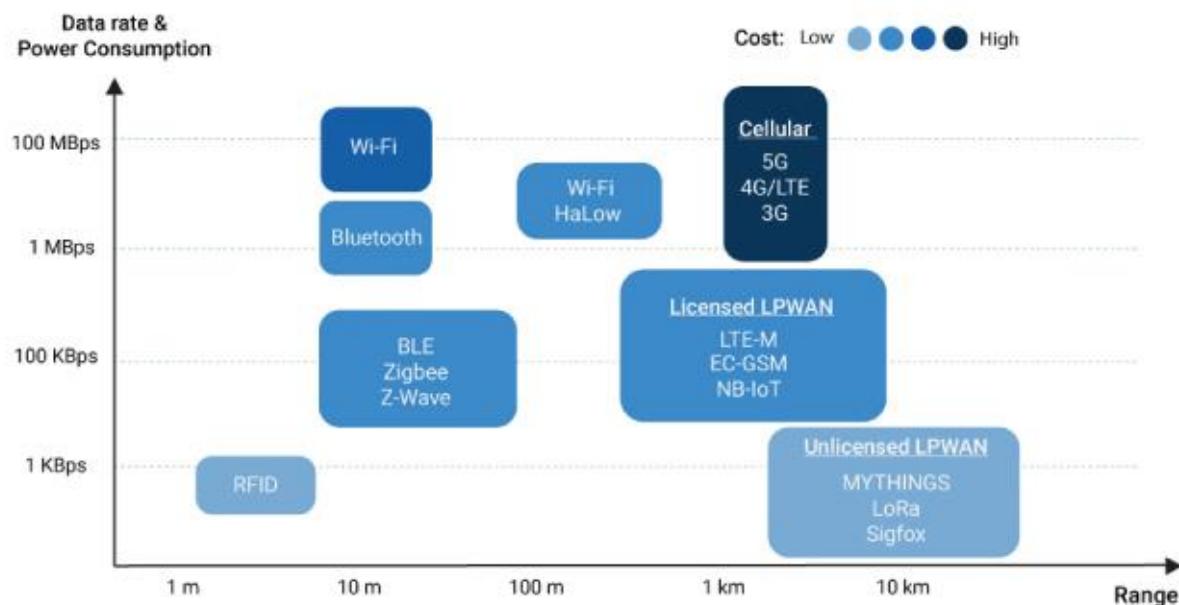
^{۱۹} Communication network

^{۲۰} Wired networks

^{۲۱} Wireless networks



شکل ۲-۶ دسته‌بندی شبکه‌های بی‌سیم از نظر برد و پوشش [26]



شکل ۲-۷ دسته‌بندی شبکه‌های بی‌سیم از نظر انرژی مصرفی، هزینه، نرخ داده و برد [26]

در میان فناوری‌های شبکه‌ی بی‌سیم موجود، یک دسته به نام فناوری‌های دوربرد با توان کم^{۲۲} به صورت ویژه در کاربردهای اینترنت اشیاء مورد استفاده قرار می‌گیرند. علت این امر این است که دستگاه‌های انتهایی در سیستم اینترنت اشیاء غالباً دارای منبع انرژی محدودی می‌باشند. از طرفی دستگاه‌های انتهایی در بسیاری از کاربردهای اینترنت اشیاء نیاز به نرخ داده بسیار پایینی دارند. در نتیجه توان مصرفی فناوری شبکه مورد استفاده توسط این دستگاه‌های انتهایی باید پایین باشد و همچنین برد بالای این فناوری‌ها یک مزیت محسوب می‌شود چرا که می‌توان دستگاه‌های انتهایی را در فواصل زیاد از هم قرار داد و در نتیجه پوشش مناسبی را در محیط ایجاد کرد. در ادامه به معرفی چند نمونه معروف از فناوری‌های دوربرد با توان کم خواهیم پرداخت.

۱-۲-۲ فناوری‌های شبکه دوربرد با توان کم

همانطور که پیشتر گفته شد، فناوری‌های دوربرد با توان کم یا همان LPWAN یک دسته از فناوری‌های شبکه هستند که مختص کاربردهای اینترنت اشیاء طراحی شده‌اند و دارای ویژگی‌هایی چون توان مصرفی پایین، برد و پوشش بالا و نرخ ارسال داده پایین (که برای اینترنت اشیاء مناسب می‌باشد)، و هزینه پایین هستند. این فناوری‌ها در کاربردهای اینترنت اشیاء مانند حمل و نقل هوشمند، شهر هوشمند و کشاورزی هوشمند استفاده می‌شوند. از جمله معروف ترین فناوری‌های دوربرد با توان کم می‌توان به فناوری IoT-SigFox^{۲۳} و LoRaWAN^{۲۴} اشاره کرد. این فناوری‌ها از طیف فرکانسی زیر ۱ گیگاهرتز یا به اصطلاح Sub-Gigahertz استفاده می‌کنند که این امر باعث نفوذ بالای سیگنال‌ها و بالا رفتن برد این فناوری‌ها می‌شود. در ادامه به اختصار به توضیح هر یک از این فناوری‌ها و دلیل انتخاب LoRaWAN به عنوان فناوری منتخب برای این پروژه می‌پردازیم [3].

LoRaWAN: شبکه LoRaWAN یکی از شبکه‌هایی است که در باند بدون مجوز^{۲۴} فرکانسی، کار می‌کند. باند بدون مجوز فرکانسی، توسط سازمان‌های مقرراتی هر کشور برای کاربردهای صنعتی، علمی و پزشکی در نظر گرفته شده است. استفاده از این باند فرکانسی به مجوز فرکانسی، نیاز ندارد. این فناوری دستگاه‌ها

²² Low Power Wide Area Network (LPWAN)

²³ Narrow Band Internet of Things

²⁴ Unlicensed

را در محدوده وسیع و با توان پایین متصل می‌کند. در هر بسته LoRaWAN می‌توان داده‌هایی تا اندازه ۲۴۲ بایت را ارسال کرد. پوشش جغرافیایی هر دروازه شبکه LoRaWAN در مناطق باز و حومه شهر تا ۱۵ کیلومتر نیز می‌رسد. این پروتکل توسط انجمن LoRa با بیش از ۵۰۰ عضو از سرتاسر دنیا حمایت و پشتیبانی می‌شود. بر اساس مرجع [4] پیش‌بینی می‌شود شبکه LoRaWAN تا سال ۲۰۲۳ میلادی ۴۳ درصد از بازار مربوط به LPWAN را در اختیار گیرد. مهم‌ترین مشخصه شبکه LoRaWAN که توانسته در کنار مزیت‌های فنی این شبکه زمینه رشد سریع آن را فراهم کند، رویکرد غیر انحصاری توسعه این پروتکل بر بستر یک جامعه آزاد و با مشارکت مجموعه‌های مختلف فناوری باشد. در فصل بعد جزئیات شبکه LoRaWAN تشریح خواهد شد.

SigFox: این فناوری برای اولین بار در سال ۲۰۰۹ توسط شرکت فرانسوی SigFox معرفی شد. SigFox داده‌های خود را تا اندازه ۱۲ بایت، در باند فرکانسی بدون نیاز به مجوز فرکانسی، و از طریق مدولاسیون پهنه‌ای باند فوق باریک (UNB)^{۲۵} انتقال می‌دهد. در شبکه SigFox هر یک از دستگاه‌های انتهایی قادر به ارسال حدود ۱۴۰ پیام روزانه (با محدودیت ارسال بیشینه ۷ پیام در ساعت) هستند که هر پیام دارای حداقل ۱۲ بایت داده اصلی^{۲۶} است. بسته‌ها در شبکه SigFox در محدوده‌ای وسیع با سرعت پایین و با مقاومت بالا در برابر تضعیف و نویز ارسال می‌شوند. لازم به ذکر است شبکه SigFox به‌طور انحصاری توسط شرکت SigFox و با همکاری شرکای منطقه‌ای توسعه می‌یابد [5].

NB-IoT: این شبکه توسط سازمان استانداردسازی 3GPP توسعه داده شده است تا امکان اتصال سرویس‌ها و دستگاه‌ها را از طریق شبکه‌های سلولی اپراتورهای موبایل فراهم کند. هدف این فناوری تمرکز بر روی هزینه کم، عمر بیشتر باتری و پشتیبانی از تعداد زیاد دستگاه‌ها است. این فناوری با بهره‌گیری از پهنه‌ای باندی باریک ۲۰۰ کیلوهرتزی می‌تواند نرخ انتقال چند ده کیلوبیتی فراهم کند [3]. یک تفاوت اساسی این فناوری با دو فناوری پیشین این است که این فناوری از باندهای فرکانسی دارای مجوز^{۲۷} استفاده می‌کند. به همین دلیل پیاده‌سازی این فناوری نیاز به دلیل نیاز به اجاره یا خریدن یک باند فرکانسی دارای مجوز،

²⁵ Ultra-Narrow Band

²⁶ Payload data

²⁷ Licensed

هزینه‌ی بیشتری خواهد داشت. این فناوری را معمولاً سرویس دهنده‌هایی که باندهای فرکانسی مجوز دار را در اختیار دارند ارائه می‌دهند.

همانطور که گفته شد، فناوری SigFox از باندفرکانسی بدون مجوز استفاده می‌کند اما این فناوری متن باز نبوده و پیاده‌سازی زیرساخت آن باید توسط خود شرکت SigFox صورت بگیرد که این امر استفاده از این شبکه را دشوار می‌کند. فناوری NB-IoT نیز به دلیل استفاده از باندهای فرکانسی مجوز دار و استفاده از زیرساخت‌های شبکه سرویس دهنده‌های موجود به عنوان زیرساخت شبکه، برای پیاده‌سازی برای منظور تحقیقاتی مناسب نیست. در مقابل شبکه LoRaWAN یک فناوری متن باز است و می‌توان به راحتی آن را پیاده‌سازی کرد. تنها لایه فیزیک این فناوری در اختیار شرکت Semtech می‌باشد و با تهیه کردن تجهیزات لایه فیزیکی، می‌توان به صورت دلخواه در مکان دلخواه و به وسعت دلخواه زیرساخت این شبکه را پیاده‌سازی کرده و در کاربردهای مورد نظرمان استفاده کنیم. در نتیجه در این پژوهه فناوری LoRaWAN به عنوان فناوری شبکه مورد نظر انتخاب شده‌است و پیاده‌سازی و ارزیابی آن صورت گرفته است. در فصل سوم به صورت کامل و جامع به توضیح این فناوری و جزئیات مورد نیاز برای پیاده‌سازی آن خواهیم پرداخت.

در جدول زیر به طور خلاصه به مقایسه چند فناوری شبکه اعم از دوربرد و میانبرد پرداخته‌ایم.

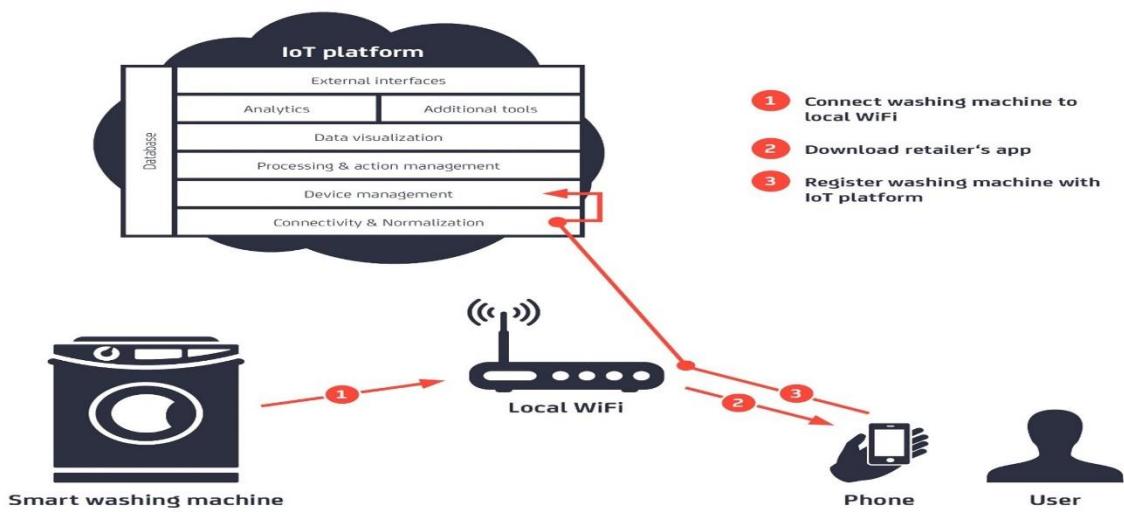
جدول ۱-۲ مروری بر چند فناوری شبکه مورد استفاده در کاربردهای اینترنت اشیاء

فناوری	پوشش منطقه‌ای	ویژگی‌ها	استانداردسازی و توصیف جزئیات
LTE-NB-IoT	پوشش منطقه‌ای وسیع با افزایش پوشش در سطح جهانی	در حال گسترش پوشش منطقه‌ای کاهش توان و هزینه در نسخه‌های جدیدتر	3GPP
WiFi	پوشش منطقه‌ای محلی	توان و تراکم بالا	IEEE
ZigBee	پوشش منطقه‌ای محلی	توان و تراکم کم	IEEE

Bluetooth Low Energy	پوشش منطقه‌ای شخصی	توان و تراکم کم	Bluetooth Special Interest Group
LoRa	پوشش منطقه‌ای وسیع فناوری نوظهور	توان و تراکم کم باندهای بدون مجوز(زیر یک گیگاهرتز)	LoRa Alliance
Sigfox	پوشش منطقه‌ای وسیع فناوری نوظهور	توان و تراکم کم باندهای بدون مجوز(زیر یک گیگاهرتز)	Sigfox

۳-۲ لایه پلتفرم یا سکو

در یک سیستم اینترنت اشیاء ۳ لایه اصلی شامل لایه دستگاه انتهایی، لایه شبکه و لایه کاربرد می‌باشند و این ۳ لایه برای پیاده‌سازی یک سیستم اینترنت اشیاء به ساده‌ترین حالت ممکن کافی می‌باشد. اما در مواقعي تعداد دستگاه‌های انتهایی ما بسیار زیاد می‌باشد، و یا در سیستم پیاده شده نیاز به تجمیع داده‌ها و تحلیل و بررسی آن‌ها برای بهبود سیستم و انجام نتیجه‌گیری داریم. هدف از وجود لایه پلتفرم در واقع انجام همین عملیات می‌باشد. در واقع از وظایف اصلی لایه پلتفرم می‌توان به نظارت، مدیریت و کنترل دستگاه‌های انتهایی، تجمیع و تحلیل و بررسی داده‌های ذخیره شده اشاره کرد. در شکل زیر ۸-۲ یک نمونه از سرویس‌هایی که در پلتفرم ارائه می‌شود قابل مشاهده است.



شکل ۸-۲ سرویس‌هایی که لایه پلتفرم ارائه می‌دهد [27]

۴-۲ لایه کاربرد

لایه کاربرد بالاترین لایه در یک سیستم اینترنت اشیاء است و لایه‌ای است که معمولاً ارتباط مستقیم با کاربر انتهایی دارد. به عنوان مثال در یک سیستم خانه هوشمند، اپلیکیشن روی گوشی صاحب‌خانه که اطلاعات دستگاه‌های هوشمند موجود در خانه و امکان تغییر در وضعیت آن‌ها وجود دارد بیانگر لایه کاربرد در سیستم خانه هوشمند می‌باشد. لایه کاربرد می‌تواند به صورت مستقیم با دستگاه‌های انتهایی و یا اینکه با پلتفرم در ارتباط باشد. در نتیجه از وظایف اصلی لایه کاربرد می‌توان به مشاهده وضعیت دستگاه‌های انتهایی و اعمال دستورات جدید و تغییرات در وضعیت دستگاه‌های انتهایی اشاره کرد.

جمع بندی

در این فصل با مفهوم اینترنت اشیاء، ساختار لایه‌ای آن و مفهوم هر لایه آشنا شدیم. یکی از مهم‌ترین بخش‌های یک سیستم اینترنت اشیاء لایه شبکه و ارتباط آن می‌باشد و انتخاب درست یک فناوری شبکه برای کاربرد مورد نظر یک تصمیم بسیار مهم است. در ادامه با چند فناوری شبکه به صورت مختصر آشنا شدیم و به صورت دقیق‌تر به بررسی فناوری‌های شبکه دوربرد با توان کم پرداختیم. در میان فناوری‌های دوربرد با توان کم فناوری LoRaWAN را انتخاب کردیم چرا که یک فناوری متن باز می‌باشد و همچنین

از باند فرکانسی بدون مجوز برای ارتباطات خود استفاده می‌کند. در فصل بعد با این فناوری بیشتر آشنا شده و به جزئیات پیاده‌سازی آن خواهیم پرداخت.

فصل سوم

فناوری شبکه LoRaWAN

فناوری شبکه LoRaWAN

در فصل قبل با مفهوم اینترنت اشیاء و معماری یک سیستم مبتنی بر اینترنت اشیاء آشنا شدیم. سپس به بررسی پروتکل‌های و فناوری‌های شبکه موجود برای پیاده‌سازی یک سیستم اینترنت اشیاء پرداختیم و در میان آن‌ها شبکه LoRaWAN را به عنوان یک فناوری ارتباطی برای پیاده‌سازی و ارزیابی انتخاب کردیم. در این فصل قصد داریم به طور دقیق و جزئی به بررسی این فناوری شبکه و بررسی ساختار و ویژگی‌های آن بپردازیم.

LoRa و LoRaWAN چیست؟^۱

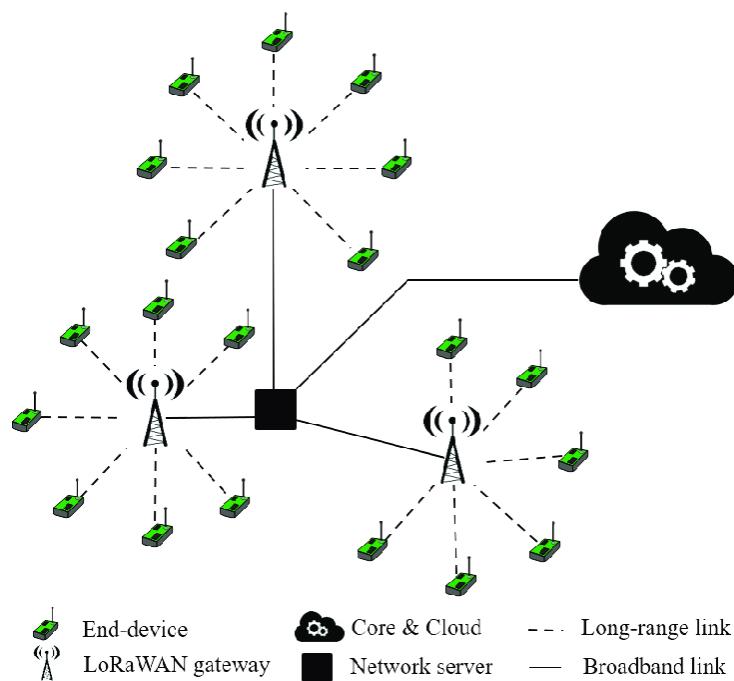
LoRa یک فناوری مدولاسیون^۲ فرکانس‌های رادیویی^۳ برای شبکه‌های دوربرد کم توان (LPWAN) است. نام LoRa (Long-Range)، اشاره‌ای به پیوندهای داده بسیار دور برد است که این فناوری فعال می‌کند. LoRa که توسط Semtech برای استانداردسازی LPWAN‌ها ایجاد شده است، ارتباطات دوربرد را تأمین می‌کند: حداکثر تا سه مایل (پنج کیلومتر) در مناطق شهری و حداکثر ۱۰ مایل (۱۵ کیلومتر) یا بیشتر در مناطق روستایی (خط دید)^۴ [14]. یکی از ویژگی‌های کلیدی راه حل‌های مبتنی بر LoRa، نیاز به توان فوق العاده کم است، که امکان ایجاد دستگاه‌هایی با باتری را فراهم می‌کند که می‌توانند تا ۱۰ سال دوام بیاورند. این شبکه از توپولوژی ستاره‌ای^۴ استفاده می‌کند که می‌توانید شکل این توپولوژی را در شکل ۱-۳ مشاهده کنید.

^۱ Modulation

^۲ Radio Frequencies (RF)

^۳ Line of sight

^۴ Star of stars



[28] توپولوژی فناوری شبکه LoRaWAN

اگرچه لایه فیزیکی LoRa در اختیار شرکت Semtech می‌باشد اما لایه MAC این فناوری به نام LoRaWAN یک فناوری متن‌باز است و می‌توان به راحتی آن را پیاده‌سازی و از آن استفاده کرد. این پروتکل و فناوری شبکه برای کاربردهایی که نیاز به برد بالا یا ارتباطاتی در عمق زیاد در ساختمان‌ها دارند، و همچنین نیاز به توان مصرفی پایین (دستگاه‌هایی که با باتری کار می‌کنند)، و نرخ ارسال اطلاعات پایین دارند، یک انتخاب بسیار مناسب می‌باشد.

در شکل ۲-۳ یک مقایسه از فناوری LoRaWAN با برخی از فناوری‌های شبکه مورد استفاده در اینترنت اشیاء را مشاهده می‌کنید.

<u>Traditional Cellular</u>	<u>LPWAN (3-5B in 2022)</u>  Long Range Low Data Rates Long Battery Life Low Cost High Capacity Potential	<u>Cat-M1</u> Long Range High Data Rates Low Battery Life Medium Cost
<u>Local Area Network (Wi-Fi)</u> Short Range High Data Rates Low Battery Life Medium Cost	<u>Narrow-Band IoT (NB-IoT)</u> Stationary Devices Short Range (indoor coverage) Low Data Rates Good Battery Life Low Cost	<u>Personal Area Network (Bluetooth®)</u> Very Short Range Low data rates Good Battery Life Low Cost

شکل ۳-۲ مقایسه فناوری های شبکه LoRaWAN با فناوری های شبکه دیگر اینترنت اشیاء [14]

۲-۳ مزایای فناوری شبکه LoRaWAN

در شکل ۳-۳ برخی از مزایای مهم فناوری LoRaWAN را مشاهده می کنید که در ادامه به اختصار بعضی توضیح داده خواهند شد.

	Long Range		Long Battery Life		High Capacity		Low Cost
<ul style="list-style-type: none"> ▪ Deep indoor coverage (including multi-floor buildings) ▪ Star topology network design 		<ul style="list-style-type: none"> ▪ Low-power optimized ▪ Up to 10-year lifetime ▪ Up to 10x versus Cellular M2M 		<ul style="list-style-type: none"> ▪ High capacity – millions of messages per base station / gateway ▪ Multi-tenant interoperability ▪ Public or private network deployments 		<ul style="list-style-type: none"> ▪ Minimal infrastructure ▪ Low cost end-node ▪ Open source software 	
	Geolocation		FUOTA		Roaming		Security
<ul style="list-style-type: none"> ▪ Indoor/outdoor ▪ Accurate without the need for GPS ▪ No battery life impact 		<ul style="list-style-type: none"> ▪ Firmware Updates Over-the-Air for applications and the LoRaWAN stack 		<ul style="list-style-type: none"> ▪ Roaming: Seamless handovers from one network to another 		<ul style="list-style-type: none"> ▪ Embedded end-to-end AES-128 encryption ▪ Unique ID ▪ Application ▪ Network 	

[14] مزایای فناوری شبکه LoRaWAN

از نظر برد و پوشش، یک دروازه واحد مبتنی بر LoRa می‌تواند سیگنال‌ها را در مسافت بیش از ۱۰ مایل (۱۵ کیلومتر) در مناطق روستایی دریافت و ارسال کند. حتی در محیط‌های متراکم شهری، پیام‌ها قادرند تا سه مایل (پنج کیلومتر) حرکت کنند، بسته به اینکه دستگاه‌های انتهایی (گره‌های انتهایی) در چه عمقی قرار دارند.

از نظر عمر باتری و انرژی مصرفی، انرژی مورد نیاز برای انتقال یک بسته داده با توجه به اینکه بسته‌های داده بسیار کوچک هستند و تنها چند بار در روز منتقل می‌شوند، بسیار کم است. علاوه بر این، هنگامی که دستگاه‌های پایانی در خواب هستند، مصرف برق بر حسب میلی‌وات (mW) اندازه گیری می‌شود و به باتری دستگاه اجازه می‌دهد که تا سال‌ها دوام بیاورد.

وقتی صحبت از ظرفیت می‌شود، یک شبکه LoRaWAN می‌تواند میلیون‌ها پیام را پشتیبانی کند. با این حال، تعداد پیام‌های پشتیبانی شده در هر نوع زیرساختی بستگی به تعداد دروازه‌های نصب شده دارد. یک دروازه هشت کاناله تنها می‌تواند چند صد هزار پیام را در طول یک دوره ۲۴ ساعته پشتیبانی کند. اگر هر دستگاه پایانی روزانه ۱۰ پیام ارسال کند، چنین دروازه‌ای می‌تواند حدود ۱۰ هزار دستگاه را پشتیبانی کند. در نتیجه اگر زیرساخت شبکه شامل ۱۰ تا از این دروازه‌ها باشد، شبکه می‌تواند تقریباً ۱۰۰۰۰۰ دستگاه و یک میلیون پیام را پشتیبانی کند. اگر ظرفیت بیشتری مورد نیاز است، تنها چیزی که نیاز است اضافه کردن دروازه‌های اضافی به زیرساخت شبکه می‌باشد.

و در مورد هزینه، با توجه به قابلیت‌های گره‌های انتهایی و دروازه‌های مبتنی بر LoRa، فقط چند دروازه-پیکربندی شده در شبکه ستاره‌ای برای خدمت به بسیاری از گره‌های پایانی کافی است. این بدان معناست که هزینه‌های سرمایه‌ای و عملیاتی را می‌توان نسبتاً پایین نگه داشت. همچنین، هنگامی که مازول‌های مقول به صرفه LoRa RF که در گره‌های انتهایی ارزان قیمت تعبیه شده‌اند، همراه با استاندارد باز استفاده شوند، بازگشت سرمایه می‌تواند قابل توجه باشد.

همچنین می‌توان از ویژگی‌های شبکه برای مکان‌یابی نسبتاً دقیق دستگاه‌های انتهایی، بدون نیاز به^۱ GPS، استفاده کرد [17].

^۱ Global Positioning System

از دیگر ویژگی های خوب این فناوری می توان به توانایی به روزرسانی برنامه دستگاهها به صورت اتومات و از طریق شبکه نام برد. با این کار هزینه به روزرسانی و همچنین انرژی صرف شده برای این کار به شدت کاهش می یابد. مخصوصا در سناریوهایی که تعداد دستگاههای انتهایی بسیار زیاد است و به روزرسانی نرمافزاری به صورت دستی آنها زمان و انرژی و هزینه زیادی را به دنبال خواهد داشت.

ویژگی محبوب و قابل توجه دیگر این فناوری، قابلیت حرکت دستگاههای انتهایی در شبکه بدون قطع شدن اتصال آنها از زیرساخت شبکه، بدون پیچیدگی خاص (این کار در شبکههای سلولی با پیچیدگی زیادی همراه می باشد) است. این ویژگی از این جهت وجود دارد که دستگاههای انتهایی پیام خود را به صورت ارسال همگانی^۱ به فضای بیرون می فرستند و هر دروازه ای که بتواند آن پیام را به صورت سالم دریافت کند آنرا برای سرور شبکه ارسال می کند و در نتیجه نیازی به دست به دست کردن دستگاه انتهایی و ایجاد پیچیدگی در شبکه وجود ندارد.

یکی یگر از ویژگی های مهم و اساسی امنیت این شبکه می باشد. با توجه به اینکه در این فناوری دستگاههای انتهایی اتصال پایداری با دروازه ها برقرار نمی کنند و پیام ها را به صورت ارسال همگانی می فرستند، این شبکه نسبت به حمله شنود آسیب پذیر می شود. برای رفع این آسیب پذیری، این فناوری داده های ارسالی را در دو مرحله رمزگذاری می کند و در نتیجه باعث به ایجاد یک بستر امن برای تبادل اطلاعات می شود.

۳-۳ مدلاسیون^۲ رادیویی و LoRa

LoRa یک روش مدلاسیون طیف گستره ^۳ مشتق شده از روش CSS⁴ موجود می باشد که یک مصالحه^۵ بین نرخ ارسال داده و حساسیت سیگنال را پیشنهاد می دهد. این فناوری روی کانال هایی با پهنای باند ثابت ۲۵۰ کیلوهرتز و ۵۰۰ کیلوهرتز (برای کanal uplink) و ۵۰۰ کیلوهرتز (برای کanal downlink) عمل

¹ Broadcast

² Modulation

³ Spread spectrum

⁴ Chirp Spread Spectrum

⁵ Trade-off

می‌کند. علاوه بر این، LoRa از عامل‌های گسترش^۱ متعامد^۲ استفاده می‌کند. همچنین فناوری شبکه LoRa از الگوریتم نرخ داده تطبیقی استفاده می‌کند. نرخ داده تطبیقی^۳ به فناوری LoRa اجازه می‌دهد که نرخ داده و قدرت سیگنال ارسالی در گره‌های انتهایی قابل تغییر و متناسب با قدرت سیگنال دریافتی از گره انتهایی در دروازه‌ها باشد. به این صورت شبکه می‌تواند طول عمر باتری دستگاه‌های انتهایی را افزایش داده و عملکردش را به گونه‌ای بهینه‌سازی بنماید. به عنوان مثال، یک دستگاه انتهایی که نزدیک یک دروازه قرار دارد باید داده‌ها را با عامل گسترش کم منتقل کند، زیرا بودجه پیوند بسیار کمی مورد نیاز است. با این حال، یک دستگاه انتهایی که در فاصله چندین مایلی از یک دروازه قرار دارد، باید با عامل گسترش بسیار بیشتری انتقال یابد. این عامل گسترش بیشتر، افزایش پردازش و حساسیت دریافت بالاتر را فراهم می‌کند، اگرچه ضرورتاً سرعت انتقال داده را کمتر خواهد کرد.

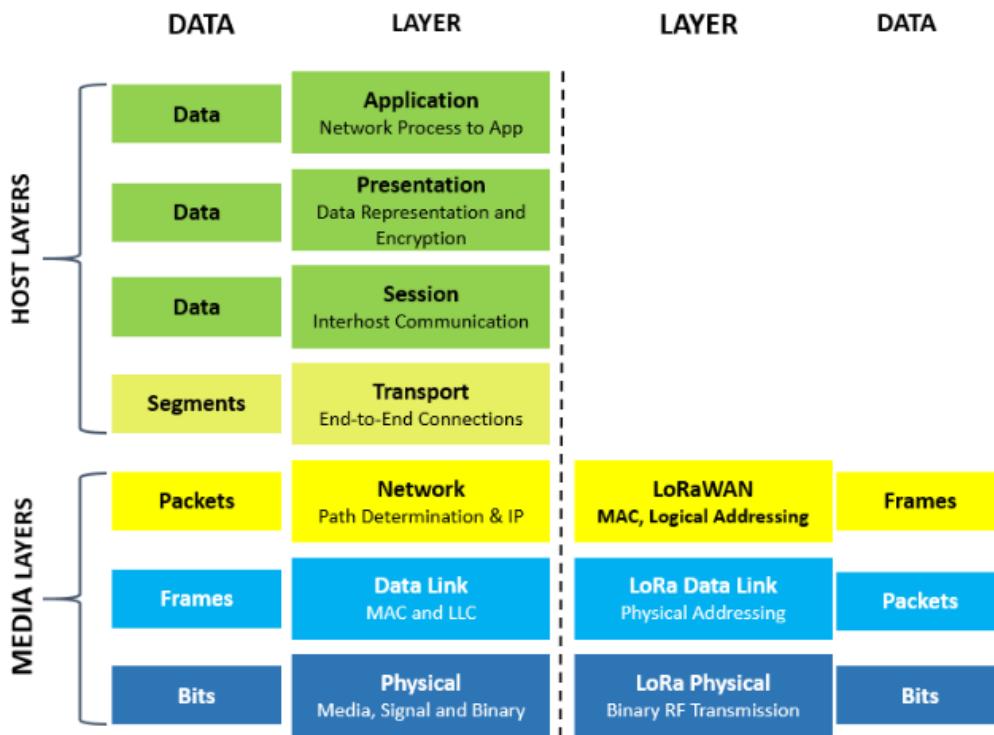
یکی از عوامل دیگری که باعث افزایش برد سیگنال‌ها در این فناوری می‌شود، استفاده از فرکانس‌های زیر ۱ گیگاهرتز یا به اصطلاح Sub Gigahertz می‌باشد. همانطور که می‌دانید، فرکانس‌های رادیویی با افزایش فرکانس قدرت نفوذشان کمتر شده و با کاهش فرکانس قدرت نفوذ بیشتری خواهند داشت. در نتیجه استفاده از فرکانس‌های زیر ۱ گیگاهرتز می‌تواند برد بالایی را برای این فناوری به ارمغان بیاورد.

LoRa به صورت محض یک پیاده سازی فیزیکی (PHY) یا لایه "بیت" است، همانطور که در مدل شبکه هفت لایه OSI تعریف شده است، که در شکل ۴-۳ نشان داده شده است. در این فناوری به جای کابل کشی، هوا به عنوان رسانه‌ای برای انتقال امواج رادیویی LoRa از فرستنده فرکانس رادیویی در دستگاه انتهایی به گیرنده فرکانس رادیویی در دروازه و بالعکس می‌باشد.

¹ Spreading factor

² Orthogonal

³ Adaptive Data Rate (ADR)

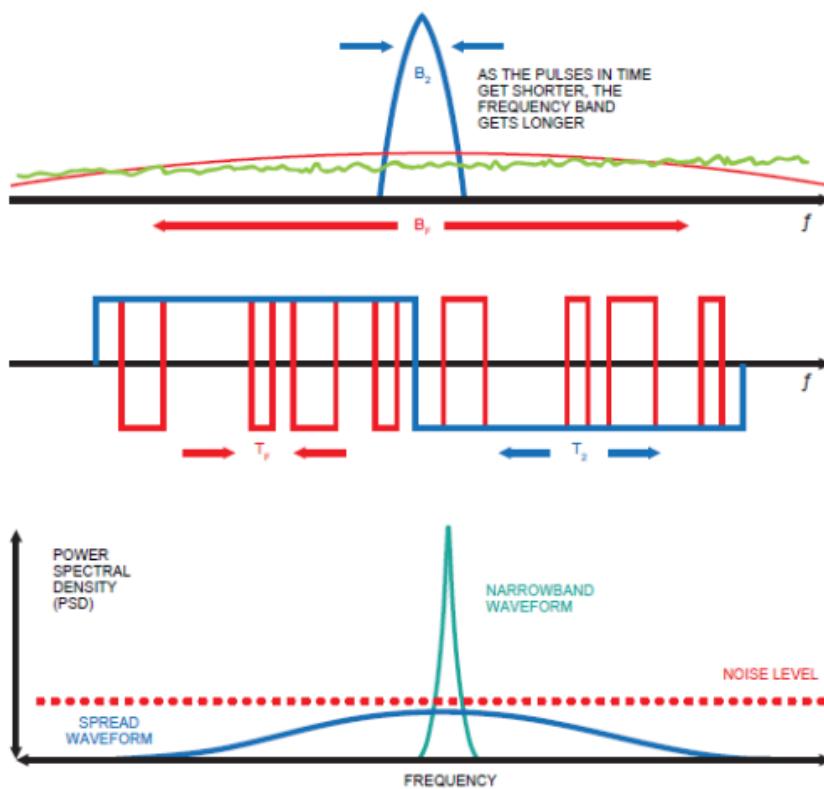


شکل ۳-۴ بررسی لایه‌بندی شبکه LoRaWAN بر حسب مدل ۷ لایه‌ای [14]

در این فناوری رابطه یک به یکی بین دروازه‌ها و دستگاه‌های انتهایی وجود ندارد، یا به عبارت دیگر اتصالی بین آن‌ها برقرار نمی‌شود. در عوض بسته‌ای که توسط دستگاه انتهایی ارسال می‌شود در هر دروازه‌ای که در برآید آن قرار دارد و سالم به آن می‌رسد، دریافت می‌شود و دروازه نیز آن را برای سرور شبکه ارسال می‌کند. تکرار بسته‌ها و حذف بسته‌های اضافه و تکراری در سرور شبکه رسیدگی می‌شود.

در یک سیستم که از طیف گسترده سری مستقیم^۱ استفاده می‌کند، فاز سیگنال حامل ارسال کننده با توجه به سری کد تغییر می‌کند که در شکل ۳-۵ این امر قابل مشاهده می‌باشد.

^۱ Direct Sequence Spread Spectrum (DSSS)



شکل ۳-۵ تغییر فاز سیگنال حامل در سیستم [14] DSSS

زمانی که سیگنال داده اصلی در یک رشته کد از پیش تعیین شده (کد گسترش) ضرب می‌شود، یک سیگنال "سریع تر" که دارای مؤلفه‌هایی با فرکانس بالاتر می‌باشد تولید می‌شود. به عبارت دیگر پهنانی باند سیگنال گسترش یافته و بیشتر از پهنانی باند سیگنال اصلی خواهد شد. وقتی این سیگنال تغییر یافته در دریافت کننده فرکانس رادیویی دریافت می‌شود، در همان رشته کد مشابه ضرب شده و از این طریق سیگنال اصلی بازیابی می‌شود. مزیت روش و استفاده از این سیستم، افزایش بودجه پیوند^۱ و در نتیجه افزایش برد سیگنال ارسالی می‌باشد.

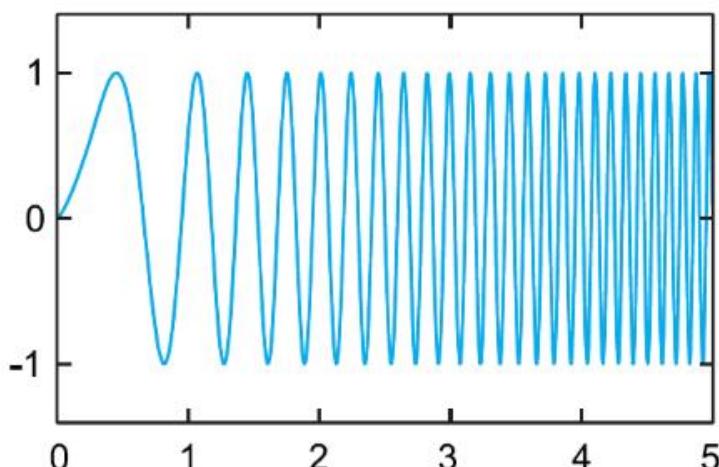
به بیت‌های رشته کد مورد استفاده به عنوان مضرب سیگنال اصلی چیپ^۲ گفته می‌شود (برای متمایز شدن نام بیت در رشته کد سیگنال اصلی و رشته کد مضرب). به نسبت نرخ چیپ در رشته کد و نرخ بیت

¹ Link budget

²Chip

در سیگنال داده در لگاریتم 10 بهره پردازش^۱ گفته می‌شود. این بهره به دریافت کننده این امکان را می‌دهد که سیگنال داده اصلی را بازیابی کند، حتی زمانی که نسبت سیگنال به نویز محیطی^۲ منفی باشد. فناوری مدلسیون LoRa نسبت به مدلسیون کلید شیفت فرکانسی^۳ از بهره پردازش بیشتری برخوردار است که اجازه می‌دهد ارسال کننده با صرف توان پایین تر و نرخ داده مشابه، بودجه پیوند مشابهی با این مدلسیون داشته باشد.

یکی از معایب سیستم طیف گسترده سری مستقیم این است که به یک ساعت مرجع^۴ بسیار دقیق نیاز دارد. در عوض، مدلسیون LoRa یک جایگزین مناسب برای مدلسیون طیف گسترده سری مستقیم است که علاوه بر هزینه کم و توان مصرفی پایین، به ساعت مرجع دقیق احتیاجی ندارد. در مدلسیون LoRa گسترش طیف سیگنال از طریق تولید سیگنال چیرپ (Chirp) که به صورت پیوسته فرکانسی تغییر می‌کند به دست می‌آید. طیف گسترده چیرپ LoRa در شکل ۳-۶ قابل مشاهده می‌باشد.



شکل ۳-۶ مدلسیون LoRa با استفاده از CSS [14]

^۱ Processing gain (Gp)

^۲ Signal to noise ratio (SNR)

^۳ Frequency shift keying (FSK)

^۴ Reference clock

یکی از مزیت‌های این روش این است که انحراف^۱ زمانی و فرکانسی بین فرستنده و گیرنده مساوی است، و در نتیجه پیچیدگی طراحی گیرنده بسیار کاهش می‌یابد.

۱-۳-۳ ویژگی‌های کلیدی مدل‌سیون LoRa

همانطور که در بالا گفته شد، بهره پردازشی LoRa در کanal فرکانس رادیویی توسط ضرب سیگنال داده در کد گسترش یا سری چیپ معرفی می‌شود. با افزایش نرخ چیپ، در حقیقت مؤلفه‌های فرکانسی طیف کلی سیگنال افزایش می‌یابد. به عبارت دیگر، انرژی کل سیگنال روی طیف وسیع‌تری از فرکانس‌ها گسترش می‌یابد که این امر به گیرنده امکان تشخیص سیگنال با نسبت سیگنال به نویز پایین‌تر (که بدتر است) را می‌دهد.

در فناوری LoRa، به مقدار کد گسترشی که به سیگنال اصلی اعمال می‌شود، عامل گسترش گفته می‌شود (SF). در مدل‌سیون LoRa از ۶ عامل گسترش مختلف (SF7 تا SF12) استفاده می‌شود. هر چه اندازه عامل گسترش بیشتر باشد، میزان مسافتی که سیگنال می‌تواند طی کند و بدون خطا در گیرنده دریافت شود افزایش می‌یابد.

در جدول ۱-۳ چهار عامل گسترش مختلف (SF7 تا SF10) برای جریان داده به سمت بالا^۲ روی کanal ۱۲۵ کیلوهرتز استفاده می‌شود را مشاهده می‌کنید. در این جدول نرخ بیت و برد تقریبی (برد بستگی به فضای پیاده‌سازی دارد و در محیط‌های روتاستایی نسبت به محیط شهری برد بیشتری خواهیم داشت) را نشان می‌دهد. همچنین زمان انتشار سیگنال در کanal هوا (ToA)^۳ برای عامل گسترش‌های مختلف در این جدول قابل مشاهده است [14].

قابل ذکر است که جریان داده به سمت پایین^۴ می‌تواند از هر ۶ عامل گسترش (SF7 تا SF12) بر روی کanal ۵۰۰ کیلوهرتز استفاده کند.

¹ Offset

² Uplink data stream

³ Time-on-Air

⁴ Downlink

جدول ۱-۳ عامل گسترش های مختلف و مشخصات شبکه برای هر یک از آنها [14]

عامل گسترش (روی کanal ۱۲۵ کیلو هرتز جریان و جریان به سمت بالا)	نرخ بیت (bps)	برد (Km)	ToA (ms)
SF10	۹۸۰	۸	۳۷۱
SF9	۱۷۶۰	۶	۱۸۵
SF8	۳۱۲۵	۴	۱۰۳
SF7	۵۴۷۰	۲	۶۱

یک موضوع مهم که مزیت فناوری LoRa محسوب می‌شود این است که عامل‌های گسترش بر هم متعامد هستند. این به این معناست که سیگنال‌هایی که با عوامل گسترش مختلفی مازوله^۱ شده‌اند و روی یک کanal فرکانسی و در یک زمان ارسال می‌شوند، با هم تداخل نداشته و برای یکدیگر مانند نویز عمل می‌کنند. سیگنال‌های LoRa بسیار پایدار و مقاوم هستند و در برابر تداخل داخل-باند^۲ و خارج-از-باند^۳ مقاومت می‌کنند. مدل‌سیون LoRa همچنین در برابر اثر چند-مسیری^۴ و محو شدگی^۵ در امان هست، که این موضوع این فناوری را برای استفاده در محیط‌های شهری و حومه شهری مناسب می‌سازد.

همانطور که پیشتر گفته شد، فناوری LoRaWAN از باندهای فرکانسی بدون مجوز و زیر ۱ گیگاهرتز استفاده می‌کند. استفاده از این فرکانس‌ها باعث می‌شود که برد سیگنال‌های فناوری افزایش یابد [11].

¹ Modulate

² In-band

³ Out-of-band

⁴ Multi-path

⁵ Fading

فرکانس‌های مورد استفاده در مناطق مختلف فرق دارد، به عنوان مثال در ایران و آمریکای شمالی از فرکانس ۹۱۵ مگاهرتز، در اروپا از فرکانس ۸۶۸ مگاهرتز و همچنین ۴۳۳ مگاهرتز بنا به موقعیت جغرافیایی استفاده می‌شود. جزئیات این تقسیم بندی در سند پارامترهای منطقه‌ای که توسط LoRa Alliance منتشر شده است قابل مشاهده می‌باشد [19]. با این وجود اشکال استفاده از فرکانس‌های بدون مجوز این است که باند فرکانسی را باید با رعایت مقررات تعیین شده توسط سازمان قانون گذاری باندهای فرکانسی کشور استفاده کرد. این مقررات استفاده از این باندها را محدود می‌کند و نمی‌توان به صورت نامحدود و دلخواه از این کانال‌ها استفاده کرد. دلیل این امر نیز رعایت مساوات بین استفاده کنندگان از این باندهای فرکانسی بدون مجوز می‌باشد. برای این منظور از اصطلاحی به نام چرخه وظیفه^۱ استفاده می‌شود که نشان دهنده درصد مجاز استفاده از کانال در روز است. به عنوان مثال چرخه وظیفه معادل ۱ درصد به معنی حق استفاده به اندازه ۱ درصد از طول شباهه‌روز می‌باشد. مشخصه‌های مدل‌سیون LoRa برای هر منطقه در سند پارامترهای منطقه‌ای موجود در سایت LoRa Alliance قابل مشاهده می‌باشد [19].

۲-۳-۳ برخورد داده^۲ و تعامد عامل گسترش

در مدل‌سیون LoRa، بسته‌هایی که از عوامل گسترش مختلفی استفاده می‌کنند بر هم متعامد هستند، و در نتیجه همانطور که بالاتر ذکر شد برای یکدیگر مانند نویز به نظر می‌آیند و تداخلی ایجاد نمی‌کنند. در نتیجه دو بسته که به صورت همزمان روی یک کانال یکسان و با عامل گسترش‌های مختلف به گیرنده می‌رسند به راحتی توسط دروازه دیماژوله^۳ می‌شوند. اما اگر این دو بسته از یک عامل گسترش یکسان استفاده کرده باشند، ممکن است برخورد رخ بدهد. اگرچه، اگر یکی از بسته‌ها از دیگری به اندازه ۶ دسیبل^۴ امکان شناسایی آن وجود دارد.

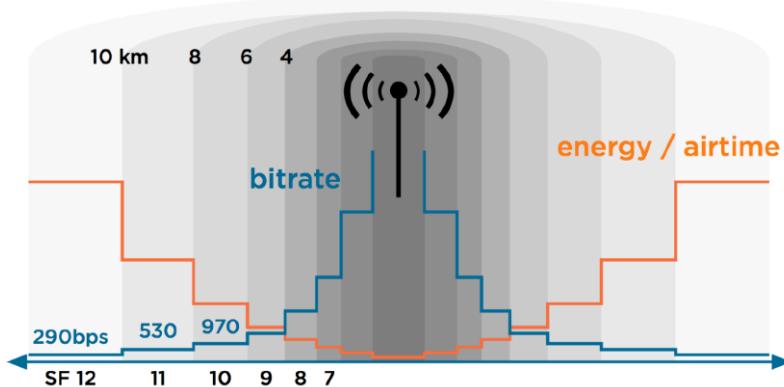
¹ Duty cycle

² Data collision

³ Demodulate

⁴ Decibel (dB)

ظرفیت زیرساخت شبکه LoRaWAN تابع تراکم دروازه‌های این شبکه می‌باشد. برای حداکثرسازی ظرفیت شبکه، استفاده از مکانیزم نرخ داده انطباقی ضروری می‌باشد. هدف اصلی نرخ داده انطباقی ذخیره انرژی بیشتر در دستگاه‌های انتهایی می‌باشد. زمانی که دستگاه‌های انتهایی به دروازه نزدیک هستند می‌توانند داده‌های خود را با کمترین عامل گسترش انتقال بدهنده و در نتیجه ToA سیگنال به حداقل رسانید، که این امر موجب طولانی تر شدن عمر باتری دستگاه انتهایی می‌شود. دستگاه‌های انتهایی که در فواصل بیشتر از دروازه‌ها قرار دارند باید داده‌های خود را با عامل گسترش بالاتری ارسال کنند. در واقع یک مصالحه بین فاصله دستگاه انتهایی از دروازه و انرژی مصرفی آن برای ارسال سیگنال وجود دارد. هرچه فاصله بیشتر باشد انرژی مصرفی بیشتر هم می‌شود و بلعکس. در شکل ۳-۷ می‌توان مصالحه بین عامل گسترش انتخابی، برد سیگنال، انرژی مصرفی و نرخ بیت را مشاهده کرد.



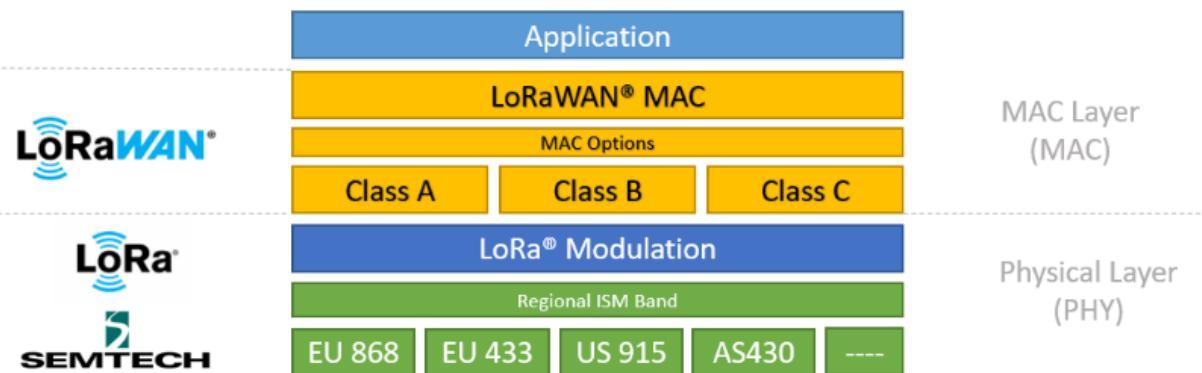
[29] شکل ۳-۷ مصالحه بین عامل گسترش، انرژی مصرفی و برد سیگنال در فناوری LoRaWAN

۴-۳ مبانی شبکه LoRaWAN

برای درک بهتر شبکه LoRaWAN به بررسی پشتۀ پروتکل^۱ این فناوری می‌پردازیم. همانطور که در شکل ۳-۸ مشهود است، LoRa فناوری مدلسیون لایه فیزیکی این پشتۀ می‌باشد که وظیفه آن مدلسیون بیسیم داده‌ها در لایه فیزیکی و ارسال آن‌ها توسط موج‌های رادیویی بر روی کانال ارتباطی (هوای) است. از

^۱ Protocol stack

طرفی LoRaWAN یک پروتکل متن-باز شبکه است که بر روی مدل‌اسیون LoRa سوار شده و یک ارتباط دوطرفه را برای دستگاه‌های انتهایی و دروازه‌ها فراهم می‌کند.

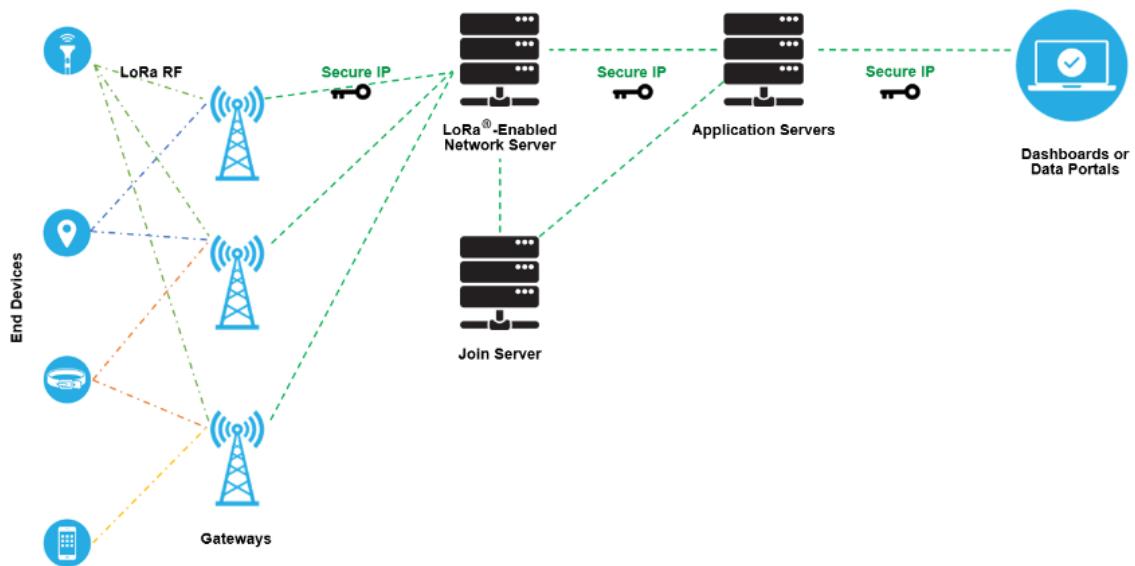


[14] شکل ۳-۸ پشته پروتکل LoRa

۱-۴-۳ اجزای شبکه LoRaWAN: معرفی

حال که در مورد مفاهیم پایه LoRaWAN اطلاعاتی را کسب کرده‌ایم، به بررسی معماری شبکه این فناوری می‌پردازیم. شکل ۳-۹ یک پیاده‌سازی انتهای-به-نتهای^۱ شبکه LoRaWAN را نمایش می‌دهد.

¹ End-to-end

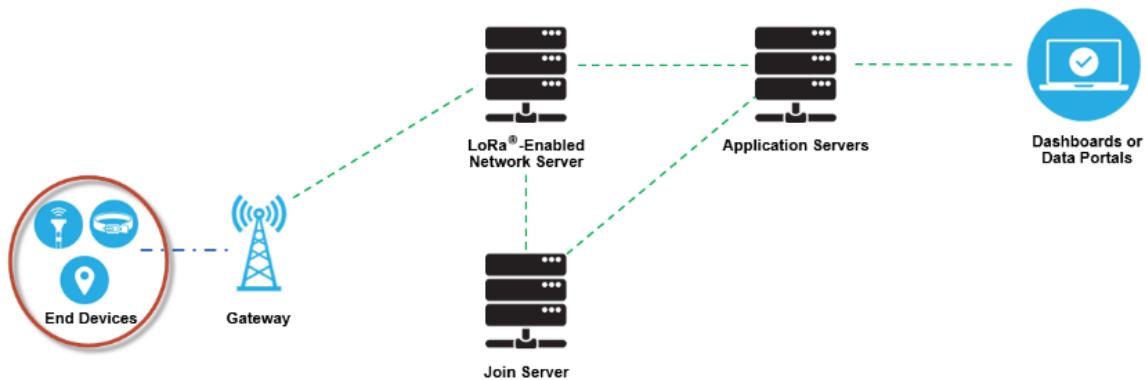


[14] LoRaWAN معماری شبکه

حال به بررسی دقیق تر هر یک از اجزاء این پیاده‌سازی می‌پردازیم.

۱-۱-۴-۳ دستگاه انتهایی مبتنی بر LoRa

یک دستگاه انتهایی مبتنی بر LoRa یک حسگر یا عملگری است که معمولاً از یک باتری به عنوان منبع انرژی استفاده می‌کند و به صورت بی‌سیم با سرور شبکه LoRaWAN از طریق دروازه‌های به وسیله مارژول رادیویی LoRa در ارتباط می‌باشد. در شکل ۱۰-۳ دستگاه انتهایی با دایره قرمز مشخص شده است.

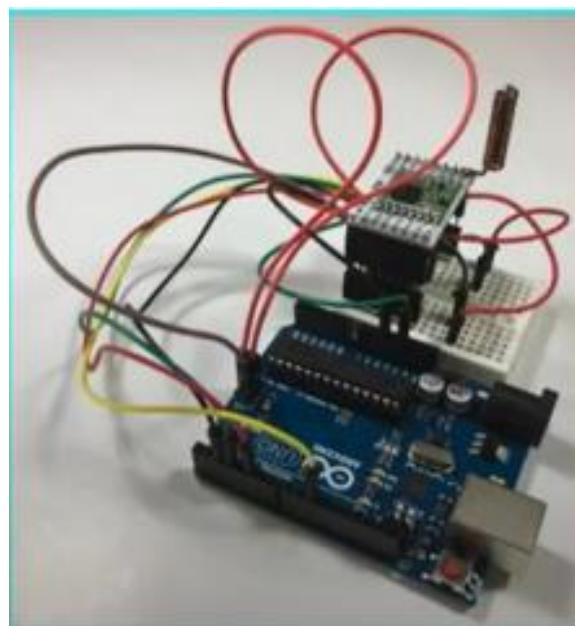


[14] دستگاه انتهایی در معماری LoRaWAN

در اکثر کاربردهای LoRaWAN، دستگاه انتهایی یک حسگر خودکار است که با باتری کار می‌کند و اطلاعات فیزیکی محیط و همچنین رخدادهای محیط را دیجیتال‌سازی^۱ می‌کند. از کاربردهای معمول دستگاه انتهایی LoRaWAN می‌توان به: روشن‌سازی خیابان‌ها، قفل‌های بی‌سیم و هوشمند، دستگاه تشخیص و جلوگیری از نشت (در صنایع پتروشیمی) اشاره کرد.

در زمان ساخت دستگاه‌های انتهایی به آن‌ها یک شناسه یکتا تخصیص داده می‌شود که از این شناسه برای فعال‌سازی امن دستگاه و شناسایی آن توسط سرور شبکه و سرور کاربرد و همچنین برقراری ارتباط امن میان دستگاه انتهایی و سرور استفاده می‌شود. در شکل ۱۱-۳ زیر یک نمونه دستگاه انتهایی مبتنی بر LoRa و پردازنده Arduino Uno را مشاهده می‌کنید [11].

¹ Digitize



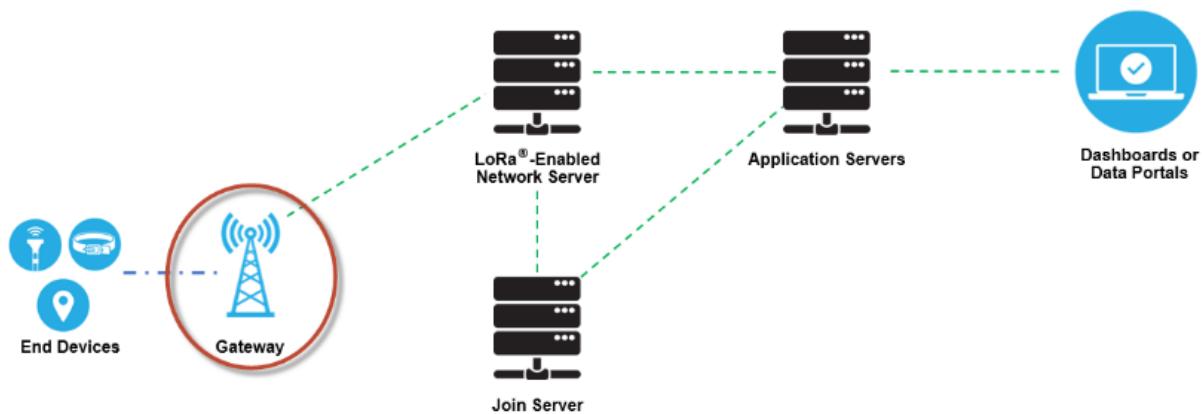
[11] Arduino Uno و LoRa بر فناوری مبتنی انتهایی

۲-۱-۴-۳ دروازه LoRaWAN

یک دروازه شبکه LoRaWAN در واقع یک کامپیوتر کوچک^۱ است که مجهز به ماژول رادیویی LoRa (تک کاناله یا چند کاناله) می‌باشد. این دروازه پیام‌های رادیویی دستگاه‌های انتهایی را که با مدل‌سیون LoRa ماژوله شده‌اند، در صورتی که در برد مناسب باشند و سیگنال به درستی به دروازه برسد را دریافت کرده و به سمت سرور شبکه LoRaWAN ارسال می‌کند. ارتباط دروازه با سرور شبکه از طریق اینترنت و شبکه قابل اطمینان^۲ IP برقرار می‌شود. در شکل ۱۲-۳ دروازه LoRaWAN با دایره قرمز نمایش داده شده است.

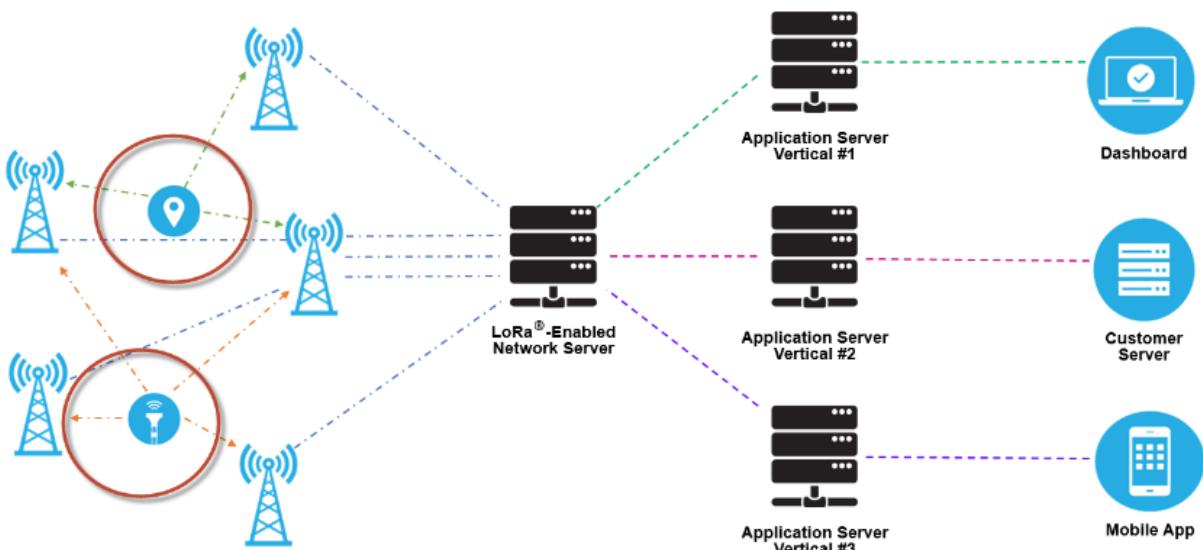
^۱ Mini computer

^۲ Reliable



[14] دروازه در معماری LoRaWAN

در شبکه LoRaWAN ارتباط پایدار و اتصالی بین دستگاه انتهایی و دروازه برقرار نمی‌شود، بلکه اطلاعات یک دستگاه انتهایی می‌تواند توسط چند دروازه دریافت شود و به سمت سرور شبکه ارسال شود. در حقیقت یک پیام به سمت بالا که توسط یک دستگاه انتهایی ارسال می‌شود، توسط هر تعداد دروازه‌ای که در برده آن دستگاه انتهایی قرار داشته باشند دریافت می‌شود. در شکل ۱۳-۳ می‌توان این موضوع را مشاهده کرد.



شکل ۱۳-۳ دریافت داده‌های ارسال شده از دستگاه‌های انتهایی انتهایی توسط چند دروازه [14]

این موضوع باعث می‌شود که میزان خطا در دریافت پیام‌ها در سرور شبکه به طور چشمگیری کاهش پیدا کند، چرا که شانس دریافت پیام دستگاه انتهایی توسط حداقل یک دروازه بسیار بالا می‌باشد. این قابلیت همچنین باعث کاهش چشمگیر مصرف انرژی در دستگاه انتهایی که متحرک می‌باشند می‌شود و اجازه می‌دهد که قابلیت مکان‌یابی از طریق شبکه LoRaWAN فعال شود (در صورتی که دروازه‌ها مججهز به مکان‌یاب باشند).

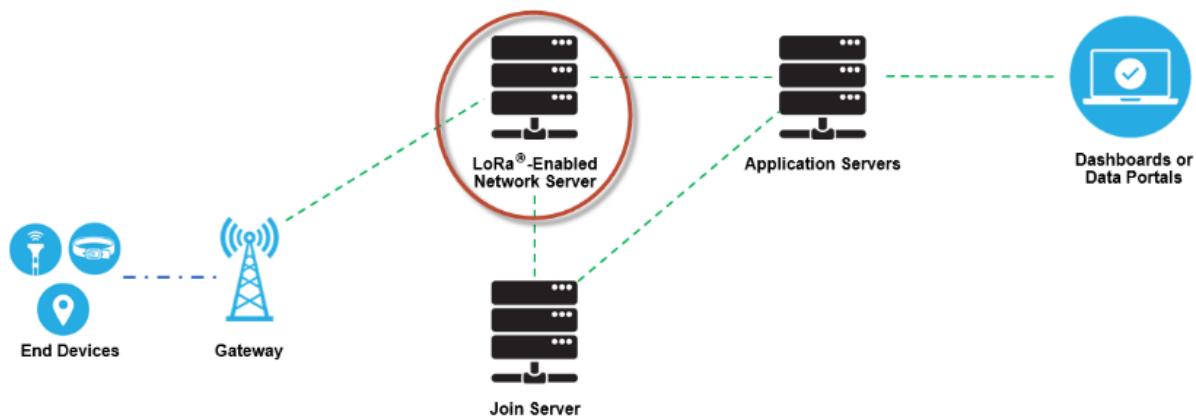
ارتباط دروازه با سرور شبکه می‌تواند توسط شبکه WiFi، ارتباط شبکه سلولی و یا ارتباط سیمی با کابل اترنت برقرار شود. دروازه LoRaWAN به صورت کامل در لایه فیزیکی عمل می‌کند و درواقع نقش آن‌ها تنها ارسال پیام‌ها به سمت سرور شبکه می‌باشد. در دروازه تنها صحت پیام رادیویی دریافت شده بررسی می‌شود و در صورت درست بودن پیام به سمت سرور شبکه فرستاده می‌شود، در غیر این صورت دروازه این پیام را دور می‌اندازد. علاوه بر پیام اصلی، تعدادی اطلاعات اضافی مانند قدرت سیگنال دریافت شده توسط دروازه به سرور شبکه ارسال می‌شود. برای پیام‌های به سمت پایین در LoRaWAN (از سمت سرور شبکه به سمت دستگاه انتهایی)، دروازه درخواست ارسال داده را بدون تفسیر متن پیام اصلی اجرا می‌کند. از آنجایی که چند دروازه می‌توانند پیام یک دستگاه انتهایی را برای سرور شبکه ارسال کنند، تکراری بودن پیام و دور انداختن پیام‌های تکراری در سرور شبکه رسیدگی می‌شود. همچنین برای ارسال پیام به سمت پایین، سرور شبکه دروازه‌ای را که پیام به سمت بالا را با مشخصات بهتری ارسال کرده (RSSI کمتری داشته) انتخاب می‌کند، زیرا این دروازه احتمالاً به دستگاه انتهایی نزدیک‌تر است و پیام را بهتر به آن می‌رساند.

LoRa پیاده‌سازی دروازه‌ها با هزینه کم و با قابلیت مقیاس‌پذیری بالا را میسر کرده است، برای مثال در آمریکای شمالی دروازه‌های ۸ کاناله، ۱۶ کاناله و ۶۴ کاناله در دسترس هستند و قابل پیاده‌سازی می‌باشند.

مشخصاً دروازه ۸ کاناله کمترین هزینه را برای پیاده‌سازی خواهد داشت. نوع دروازه انتخابی بستگی به کاربردی دارد که قصد پیاده‌سازی آن را داریم. دروازه‌های ۸ کانال و ۱۶ کاناله را می‌توان هم برای محیط داخلی و هم محیط خارجی استفاده کرد، اما دروازه ۶۴ کاناله تنها برای محیط خارجی استفاده می‌شوند و باید در مکان‌هایی مثل برج‌های مخابراتی، بالای سقف ساختمان‌های بلند و مانند این‌ها پیاده‌سازی شوند.

۳-۱-۴-۳ سرور شبکه LoRaWAN

سرور شبکه LoRaWAN در حقیقت وظیفه کنترل تمام شبکه را دارد، به صورت پویا پارامترهای شبکه را کنترل می‌کند تا سیستم را با تغییرات وقف بدهد. همچنین یک ارتباط امن رمزگذاری شده با پروتکل AES ۱۲۸ بیتی را برای رد بدل کردن داده‌ها از دستگاه‌های انتهایی تا سرور شبکه و سرور کاربرد برقرار می‌کند. سرور شبکه علاوه بر این‌ها نقش احراز هویت دستگاه‌های انتهایی و بررسی صحت پیام‌ها را بر عهده دارد [12]. با این حال سرور شبکه نمی‌تواند محتوای پیام‌های سرور کاربرد را ببیند (به دلیل رمزگاری ۲ لایه‌ای در LoRaWAN که در ادامه توضیح خواهیم داد). در شکل ۱۴-۳ سرور شبکه با دایره قرمز مشخص شده است.



[14] سرور شبکه در معماری LoRaWAN

به طور کلی، تمام سرورهای شبکه LoRaWAN موارد ذیل را انجام می‌دهند:

- بررسی آدرس دستگاه‌های انتهایی برای احراز هویت آن‌ها
- احراز هویت فریم^۱‌ها و مدیریت شمارش فریم‌ها
- تصدیق^۲ پیام‌های دریافت شده
- تغییر و تطبیق نرخ داده با استفاده از پروتکل نرخ داده تطبیقی

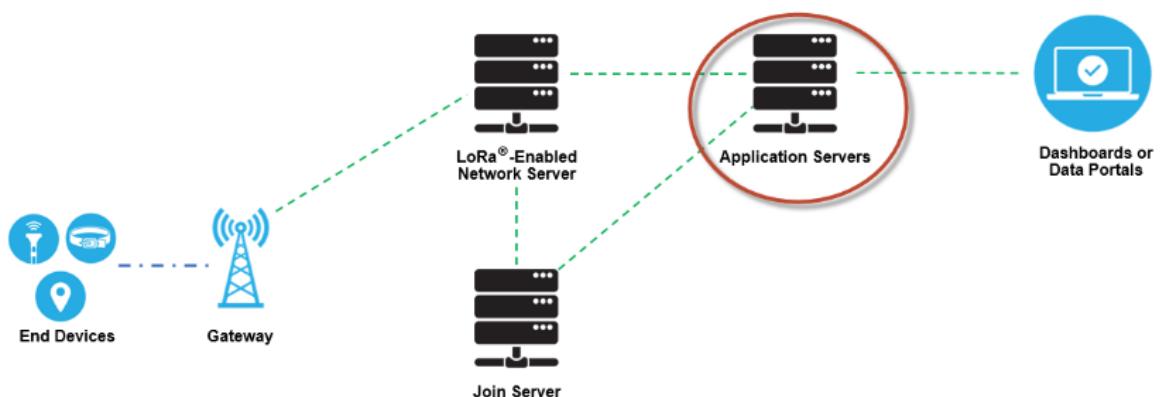
¹ Frame

² Acknowledgement

- پاسخ به تمام درخواست‌های لایه MAC که از دستگاه‌های انتهایی می‌آید
- ارسال پیام‌های به سمت بالا برای سرور کاربرد مناسب
- ارسال پیام‌های به سمت پایین که از سرور کاربرد برای دستگاه‌های انتهایی ارسال می‌شود
- رد و بدل کردن پیام‌های درخواست-پیوست^۱ و پذیرش-پیوست^۲ میان دستگاه‌های انتهایی و سرور-پیوست^۳

4-1-4-3 سرور کاربرد

وظیفه سرور کاربرد در LoRaWAN رسیدگی، مدیریت و تفسیر داده‌های ارسال شده از سمت دستگاه‌های انتهایی می‌باشد. همچنین محتوای لایه کاربرد پیام‌ها که به سمت دستگاه انتهایی می‌رود در این سرور تولید می‌شود. در شکل ۱۵-۳ سرور کاربرد با دایره قرمز مشخص شده است.



[14] سرور کاربرد در معماری ۱۵-۳

¹ Join-request

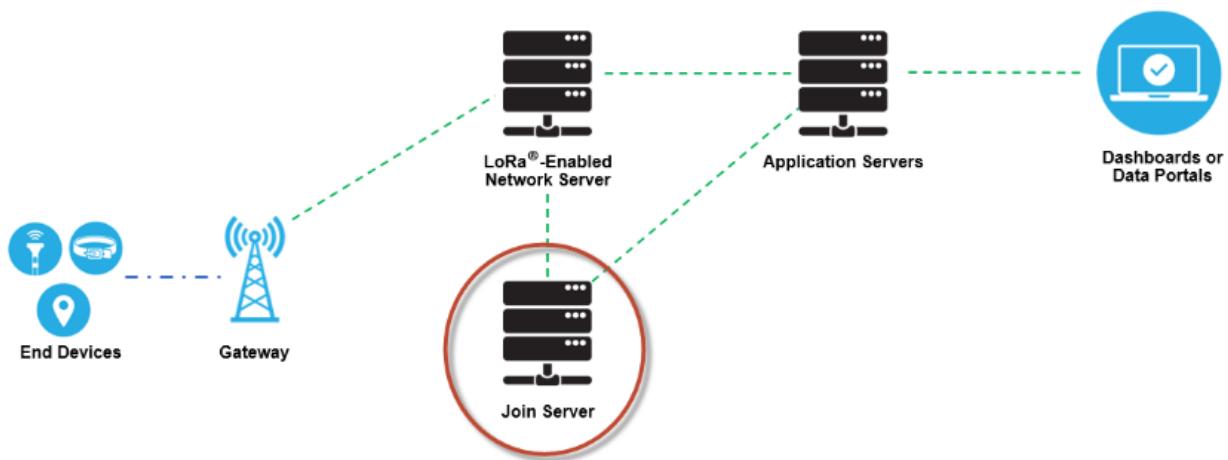
² Join-accept

³ Join-server

۱۶-۳ سرور پیوست^۱

وظیفه سرور پیوست مدیریت فرآیند فعالسازی دستگاه‌های انتهایی از روش OTAA^۲ (در ادامه در مورد روش‌های فعالسازی دستگاه‌های انتهایی توضیح داده خواهد شد)، و اضافه شدن آن‌ها به شبکه LoRaWAN می‌باشد.

سرور پیوست اطلاعات مورد نیاز برای پردازش فریم‌های درخواست-پیوست را در اختیار دارد و همچنین وظیفه ایجاد فریم‌های پذیرش-پیوست به سمت پایین را دارد. سرور پیوست به سرور شبکه اطلاع می‌دهد که کدام دستگاه انتهایی باید به کدام سرور کاربرد متصل شود، و فرآیند تولید کلیدهای رمزگذاری جلسه سرور^۳ و جلسه کاربرد^۴ نیز بر عهده سرور پیوست می‌باشد. سرور پیوست سپس کلید جلسه سرور را برای سرور شبکه و کلید جلسه کاربرد را برای سرور کاربرد متناظر با دستگاه انتهایی ارسال می‌کند. در شکل ۱۶-۳ سرور پیوست با دایره قرمز مشخص شده است.



شکل ۱۶-۳ سرور پیوست در معماری [14] LoRaWAN

^۱ Join-Server

^۲ Over-the-air-activation

^۳ Network session key

^۴ Application session key

برای انجام وظایف ذکر شده، سرور پیوست باید دارای اطلاعات زیر، برای هر دستگاه انتهایی که در کنترلش است، باشد:

- آدرس یکتای DevEUI (آدرس سریال یکتای مشخص کننده دستگاه انتهایی)
- کلید کاربرد AppKey (کلید رمزگذاری لایه سرور کاربرد)
- کلید سرور NwKey (کلید رمزگذاری لایه سرور شبکه)
- مشخص کننده^۱ سرور کاربرد
- نمایه^۲ سرویس دستگاه انتهایی

۲-۴-۳ اجزاء شبکه LoRaWAN: راهاندازی دستگاه انتهایی

دستگاه‌های انتهایی برای منظور برقراری امنیت، کیفیت سرویس^۳ و موارد حسابرسی باید در ابتدای شروع به کارشان روی شبکه راهاندازی و فعال بشوند. فرآیند راهاندازی سرور شبکه و دستگاه‌های انتهایی را با تأمین پارامترهای ضروری آن‌ها هم تراز می‌سازد (پارامترهایی مانند شناساگر، کلیدهای رمزگذاری و مکان سرورها).

در فناوری LoRaWAN دو نوع فعالسازی برای دستگاه‌های انتهایی وجود دارد: ۱- Activation By Personalization (ABP) - ۲ Activation (OTAA)

در جدول ۲-۳ مشخصات مختلف این دو روش ذکر شده‌است.

¹ Identifier

² Profile

³ Quality of service

جدول ۲-۳ مقایسه دو روش راه اندازی دستگاه انتهایی

Over-the-Air-Activation (OTAA)	Activation by Personalization (ABP)
سازندگان دستگاه به صورت خودکار پارامترهای ضروری را تولید می‌کنند	روش ساده شده و در عین حال با امنیت کمتر برای راه اندازی دستگاه‌های انتهایی
کلیدهای رمزگذاری به طور منظم می‌توانند دوباره ساخته شوند	سریال شناسایی و کلیدها در زمان ساخت دستگاه روی آن تنظیم می‌شوند
دستگاه انتهایی می‌تواند چندین هویت مختلف را در خود ذخیره کنند و به صورت پویا و امن سرور شبکه خود را در طول عمر خود تغییر دهند	دستگاه به محض روشن شدن فعالیت خودش را آغاز می‌کند، چرا که رویه پیوست حذف می‌شود
امنیت سطح بالا و امنیت غیرقابل دستکاری برای دستگاه‌های انتهایی فراهم می‌شود	دستگاه‌های انتهایی به یک سرویس/سرور خاص وصل می‌شوند و نمی‌توانند به صورت پویا سرور خود را تغییر دهند

۳-۴-۳ اجزاء شبکه LoRaWAN: امنیت

دو المان کلیدی در بحث امنیت شبکه LoRaWAN وجود دارد: رویه پیوست^۱ و پیام احراز هویت^۲. رویه پیوست احراز هیئت متقابل بین دستگاه انتهایی و سرور شبکه‌ای که به آن متصل است را برقرار می‌کند. تنها دستگاه‌هایی که هویت آن‌ها احراز شود اجازه پیوستن به شبکه را دارند. لایه MAC فناوری LoRaWAN و پیام‌های لایه کاربرد احراز شده، دارای صحت و رمزشده به صورت انتها-به-انتها می‌باشند (از دستگاه انتهایی به سرور کاربرد و بلعکس).

ویژگی‌های امنیتی در شبکه LoRaWAN موارد زیر را تضمین می‌کنند:

- ترافیک شبکه تغییر داده نشده باشد

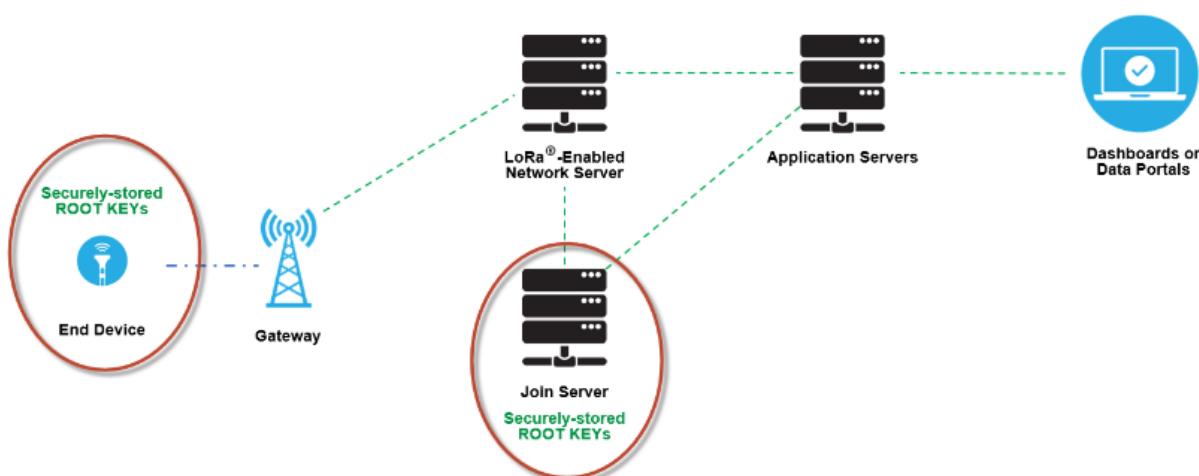
¹ Join procedure

² Authentication

- تنها دستگاه‌های انتهایی قانونی و احراز شده اجازه اتصال به شبکه LoRaWAN را دارند.
 - ترافیک و داده‌های شبکه قابل شنود نیستند (جلوگیری از حمله استراق سمع^۱)
 - ترافیک شبکه قابل دستیابی و ضبط و تکرار نیستند
- حال به بررسی جزئی تر اقدامات امنیتی شبکه LoRaWAN می‌پردازیم.

۱-۳-۴-۳ رویه پیوست^۲

ابتدا با کلیدهای رمزگذاری، که در شکل ۱۷-۳ نشان داده شده‌اند شروع می‌کنیم. کلیدهای ریشه فردی^۳ به صورت امن در دستگاه‌های انتهایی ذخیره شده‌اند، و کلیدهای تطابق^۴ به صورت امن در سرور پیوست ذخیره شده‌اند.



شکل ۱۷-۳ کلیدهای امنیتی ساخته شده در رویه پیوست [14]

دستگاه انتهایی یک پیام درخواست پیوست به سرور پیوست ارسال می‌کند و سپس سرور پیوست پس از احراز هویت دستگاه انتهایی و بررسی صحت سروری که می‌خواهد به آن متصل شود، یک پیام پذیرش

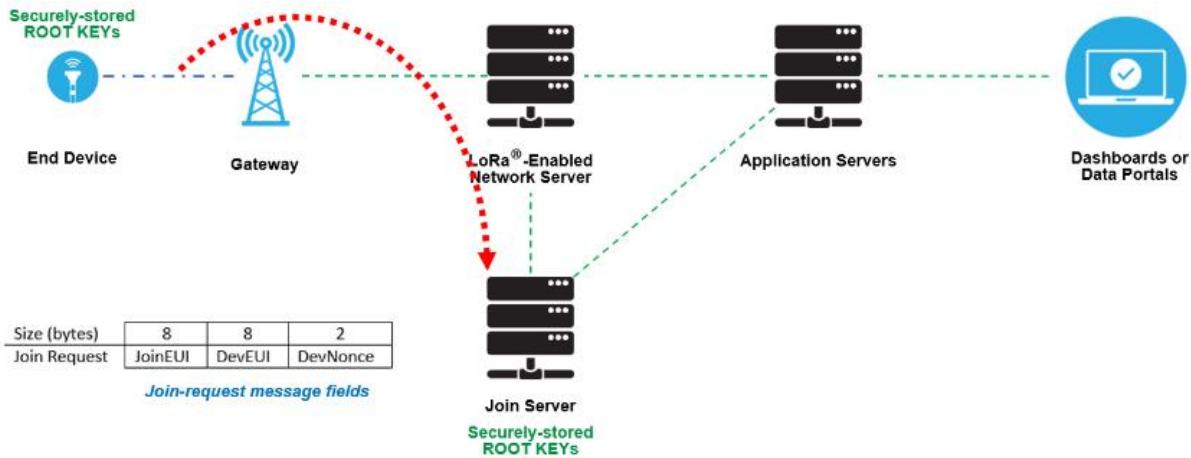
¹ Eavesdropping

² Join procedure

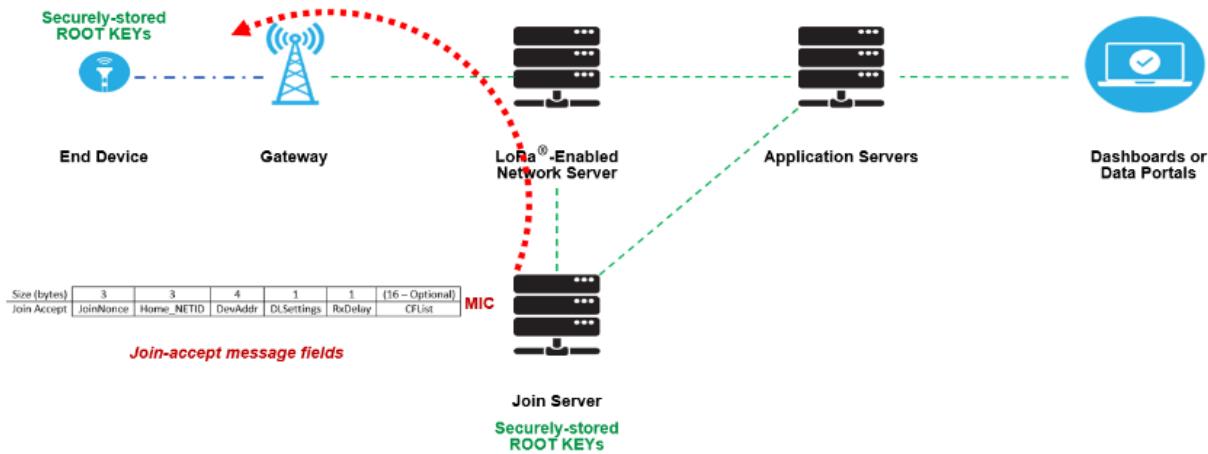
³ Individual root keys

⁴ Matching keys

پیوست برای دستگاه انتهایی ارسال می‌کند. این فرآیند به ترتیب در شکل‌های ۱۸-۳ و ۱۹-۳ نمایش داده شده است.



شکل ۱۸-۳ ارسال پیام درخواست پیوست به سرور پیوست توسط دستگاه انتهایی [14]

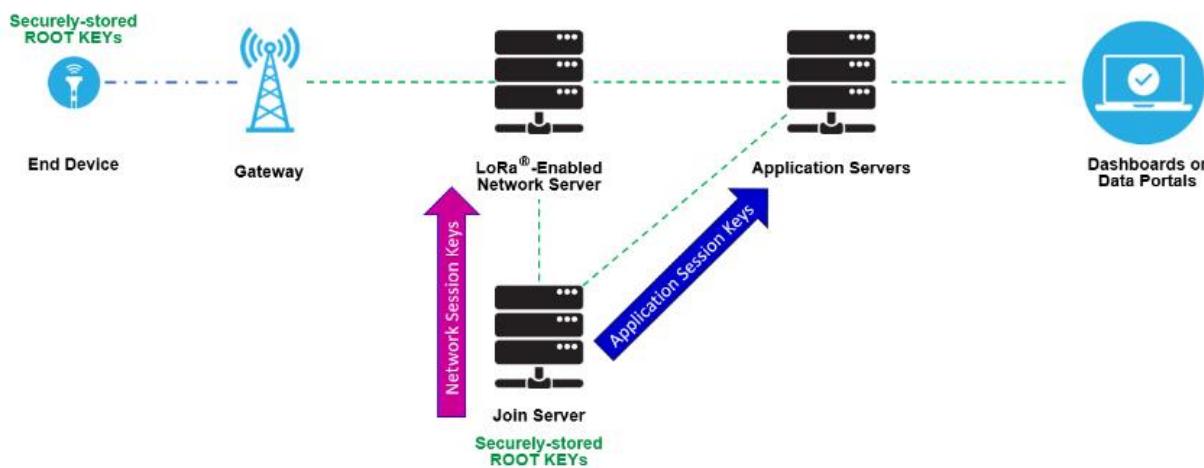


شکل ۱۹-۳ ارسال پیام پذیرش پیوست توسط سرور پیوست به دستگاه انتهایی [14]

در ادامه، دستگاه انتهایی بر اساس شناسه دستگاه (DevEUI)، شناسه یکتای پیوست (Join EUI)، عدد دلخواه دستگاه (DevNonce)، کلیدهای ریشه (root keys) و یکسری از اطلاعات موجود در پیام‌های درخواست پیوست و پذیرش پیوست، کلیدهای جلسه^۱ را به صورت محلی استخراج می‌کند. در آن سمت

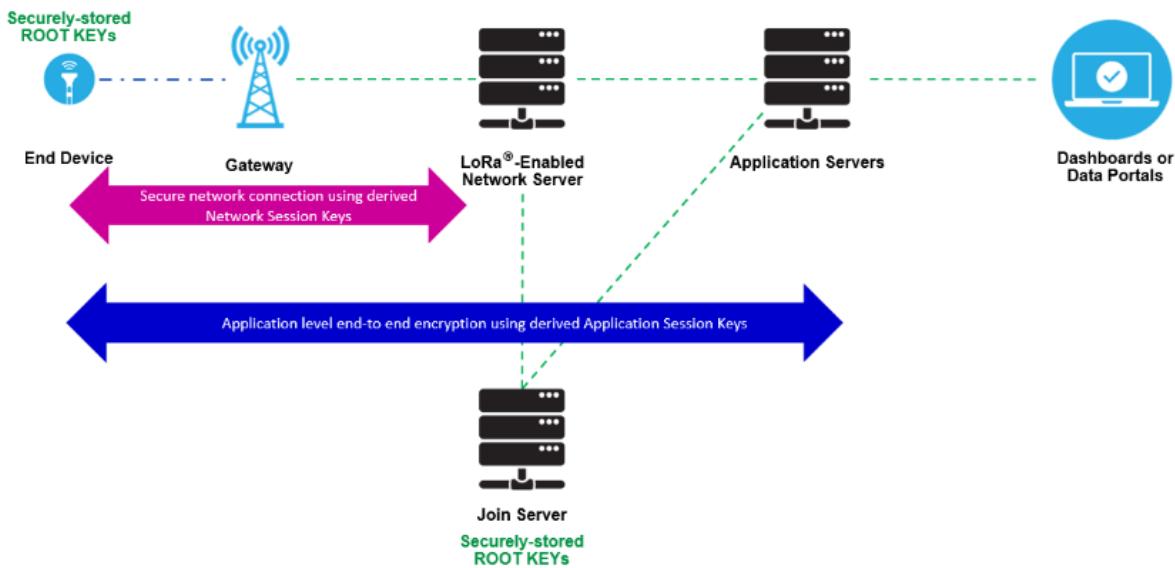
^۱ Session key

نیز سرور پیوست کلیدهای جلسه را از روی سریال های شناسایی (Serial IDs)، کلید های ریشه و اطلاعات موجود در پیام های درخواست پیوست و پذیرش پیوست استخراج می کند. در نهایت، سرور پیوست کلیدهای جلسه را با سرورهای شبکه و سرورهای کاربرد به اشتراک می گذارد. این فرآیند در شکل ۲۰-۳ نشان داده شده است.



شکل ۲۰-۳ اشتراک گذاری کلید جلسه شبکه و کلید جلسه کاربرد به سرور شبکه و سرور کاربرد [14]

در فناوری LoRaWAN از یک رمزنگاری دولایه ای استفاده می شود. رمزگذاری لایه اول توسط کلید جلسه سرور شبکه (NwkSKey) بین دستگاه انتهایی و سرور شبکه با استفاده از الگوریتم AES ۱۲۸ بیتی انجام می شود. رمزگذاری لایه دوم نیز توسط کلید جلسه سرور کاربرد (AppSKey) بین دستگاه انتهایی و سرور کاربرد با استفاده از الگوریتم AES ۱۲۸ بیتی انجام می شود [12]. بنابراین ترافیک داده بین دستگاه انتهایی و سرور کاربرد نه در سرور شبکه و نه در دروازه ها قابل خواندن نمی باشد. در شکل ۲۱-۳ این رمزگذاری لایه ای قابل مشاهده است.



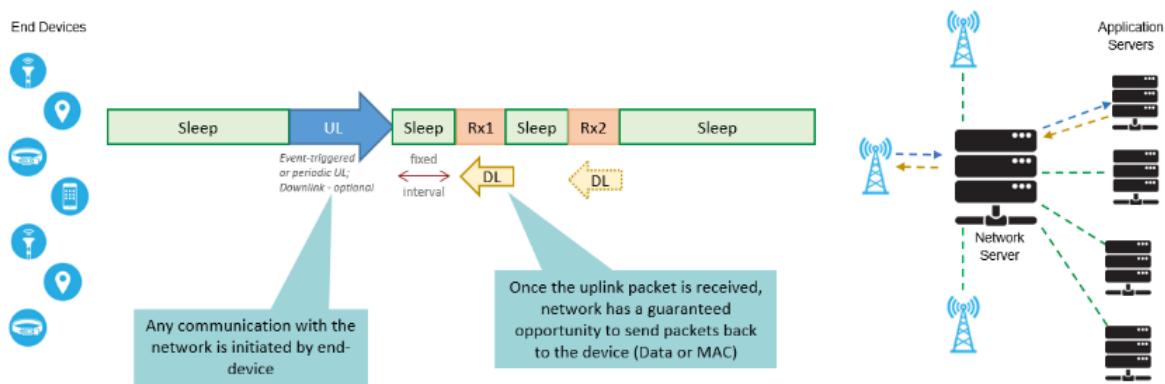
[14] رمزگذاری دو لایه‌ای در فناوری LoRaWAN

۴-۴-۳ کلاس‌های دستگاه‌های انتهایی: A، B و C

دستگاه‌های انتهایی مبتنی بر LoRa در یکی از سه حالت، بنابر کلاس آن دستگاه، عمل می‌کنند. همه دستگاه‌های انتهایی مبتنی بر LoRa کلاس A را پشتیبانی می‌کنند. دستگاه‌های کلاس B هم کلاس A و هم کلاس B، و دستگاه‌های کلاس C هر سه کلاس را پشتیبانی می‌کنند [8]. این کلاس‌ها نحوه ارتباط دستگاه‌نهایی در شبکه را مشخص می‌سازند.

۱-۴-۴ دستگاه‌های انتهایی کلاس A

شکل ۲۲-۳ نحوه کار دستگاه‌های کلاس A را نشان می‌دهد.



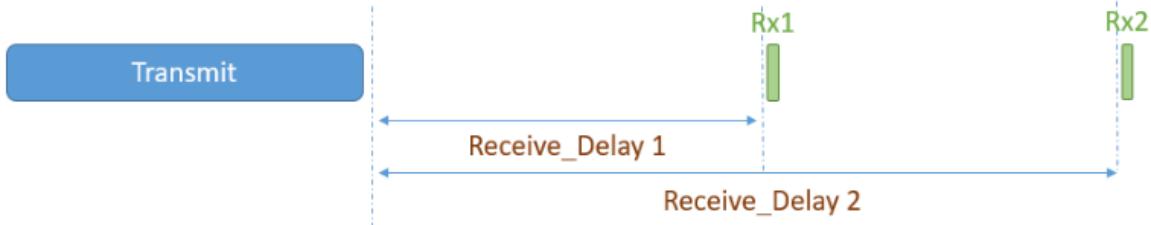
شکل ۳-۲۲ نحوه عملکرد دریافت دستگاه انتهایی کلاس A [14]

در این کلاس، ستگاه انتهایی بیشتر زمان را در حالت بیکار^۱ قرار دارد (حالت خواب). زمانی که تغییری در محیط ایجاد می‌شود که دستگاه باید آن را ثبت کند، دستگاه بیدار شده و تغییرات را در پیام به سمت بالا برای سرور شبکه ارسال می‌کند. سپس، دستگاه منتظر دریافت پاسخ از سمت شبکه، معمولاً برای ۱ ثانیه (این زمان قابل تغییر می‌باشد) می‌ماند. اگر در این پنجره دریافت داده‌ای دریافت نکند (Received window RX1)، برای مدت کوتاهی به خواب می‌رود و سپس دوباره پس از لحظاتی بیدار شده و در پنجره دریافت دوم (RX2) منتظر دریافت پیام از سمت سرور شبکه می‌شود. اگر در پنجره دریافت دوم نیز داده‌ای دریافت نکند، دستگاه به حالت خواب می‌رود و تا زمان ارسال یک داده به سمت بالای دیگر در حالت خواب می‌ماند. زمان تاخیر بین پنجره دریافت اول و پنجره دریافت دوم قابل پیکربندی می‌باشد.

نکته این کلاس این است که هیچ راهی برای بیدار کردن دستگاه خارج از پنجره‌های دریافت آن، به جز ارسال داده به سمت بالا وجود ندارد. در نتیجه با توجه با این محدودیت، دستگاه‌های کلاس A برای پیاده‌سازی عملگرها روی آن‌ها مناسب نمی‌باشند [14].

شکل‌های ۳-۲۳، ۳-۲۴ و ۳-۲۵ الگوی کار دستگاه‌های این کلاس را نشان می‌دهند.

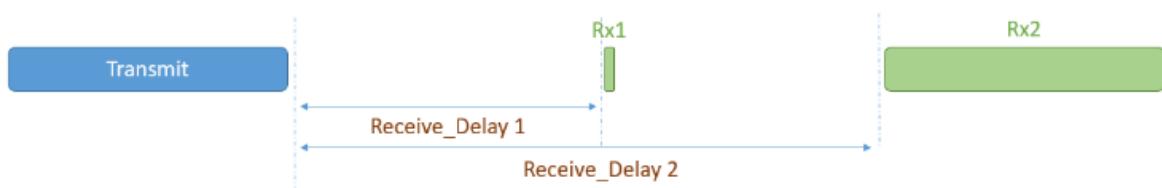
^۱ Idle



شکل ۳-۲۳ دستگاه کلاس A زمانی که در پنجره دریافت دادهای دریافت نمی‌کند [14]



شکل ۳-۲۴ دستگاه کلاس A زمانی که در پنجره اول دریافت داده دریافت می‌کند [14]



شکل ۳-۲۵ دستگاه کلاس A زمانی که در پنجره دریافت دوم داده دریافت می‌کند [14]

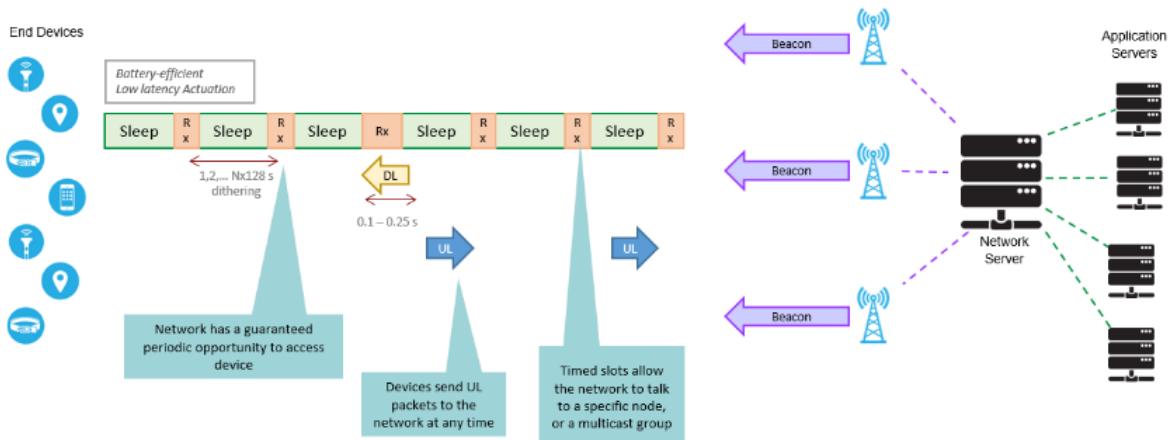
دستگاه تنها در یکی از حالت‌های زیر داده به سمت بالا ارسال می‌کند:

- یک پیام به سمت پایین در پنجره دریافت RX1 دریافت کرده باشد، یا
- پنجره دریافت دوم (RX2) کامل شده باشد.

۲-۴-۳ دستگاه‌های انتهایی کلاس B

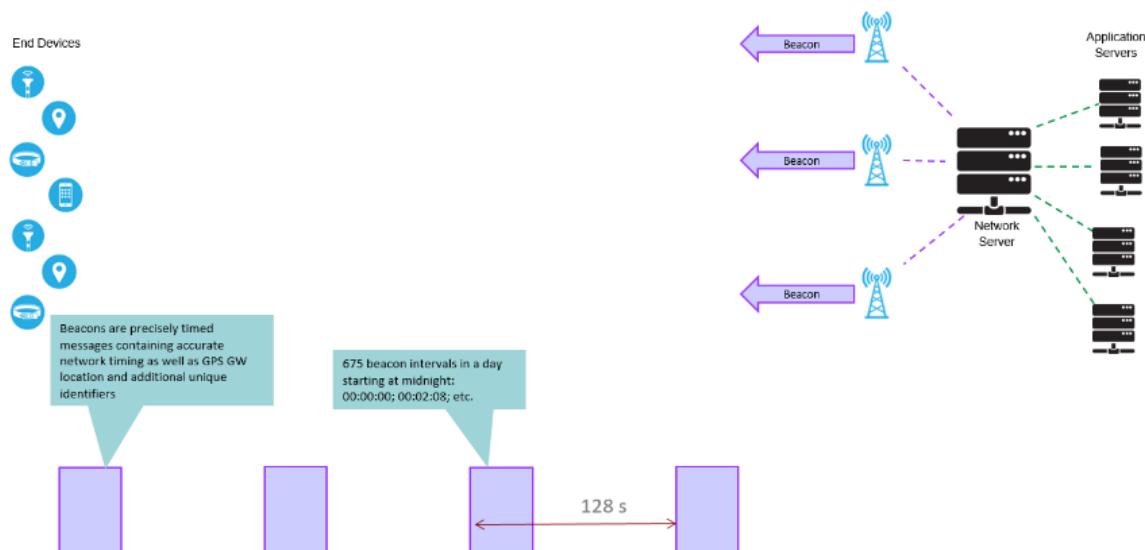
کلاس B نمونه بهبود یافته کلاس A می‌باشد که در آن دستگاه طبق زمان بندی منظم در زمان‌های خاص برای دریافت داده به سمت پایین بیدار می‌شود. در نتیجه این کلاس هم برای پیاده‌سازی حسگرها و هم عملگرها مناسب می‌باشد. تمام دستگاه‌های انتهایی LoRa در زمان ساخت به صورت پیش فرض روی کلاس A قرار می‌گیرند و اگر دستگاه توانایی تبدیل به کلاس B داشته باشد می‌توان آن را از کلاس A به کلاس B تغییر داد.

برای درست عملکردن دستگاه‌های کلاس B، یک فرآیند به نام Beaconing لازم است. طی این فرآیند، Beacon‌های منظم بر اساس زمانبندی توسط سرور شبکه و از طریق دروازه‌ها به صورت دوره‌ای ارسال همگانی می‌شوند. دستگاه انتهایی با دریافت این Beacon‌ها مرجع زمانی خودش را برای بیدار شدن و باز کردن پنجره دریافت تنظیم می‌کند. فرآیند ذکر شده در شکل ۲۶-۳ قابل مشاهده می‌باشد.



شکل ۲۶-۳ فرآیند Beaconing در دستگاه‌های انتهایی کلاس B [14]

همانطور که گفته شد دستگاهها از Beacon ها برای تنظیم مرجع زمانی خود با سرور شبکه استفاده می‌کنند و یک دستگاه لازم نیست که تمام بسته‌های Beacon را دریافت کند و تنها با دریافت تعدادی Beacon در طول روز می‌تواند خودش را همگام^۱ کند. در شکل ۲۷-۳ Beaconing دوره‌ای برای همگام سازی دستگاه‌های انتهایی مشاهده می‌شود. برای اینکه شبکه LoRaWAN بتواند از کلاس B پشتیبانی کند، تمام دروازه‌های شبکه باید مجهز به منبع زمانی GPS باشند که بتوانند خودشان را با زمان دقیق ارسال Beacon همگام کنند. همانطور که گفته شد، دستگاه‌های کلاس B می‌توانند در حالت کلاس A نیز قرار بگیرند.



شکل ۲۷-۳ Beaconing دوره‌ای برای همگام‌سازی دستگاه‌های انتهایی [14]

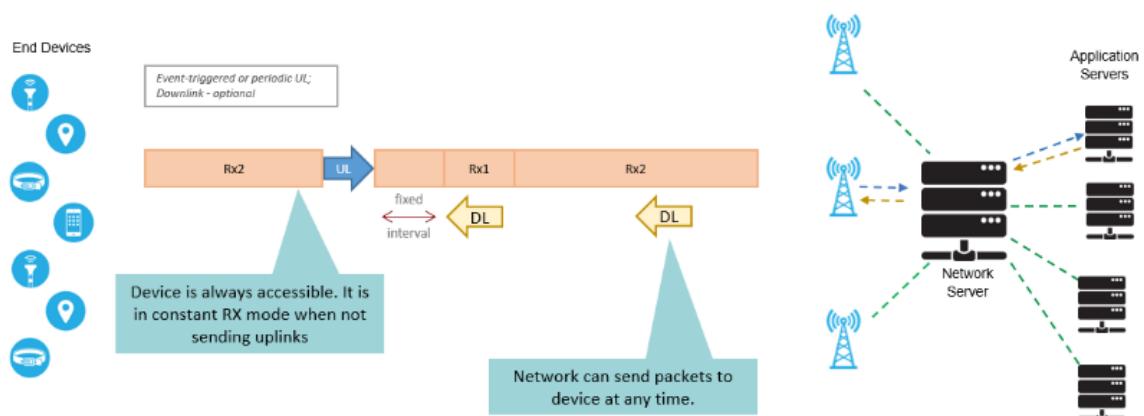
۳-۴-۴-۳ دستگاه‌های انتهایی کلاس C

دستگاه‌های کلاس C همیشه روشن هستند، در نتیجه آن‌ها نمی‌توانند با باتری عمل کنند و باید به یک منبع تغذیه ثابت متصل شوند. برای مثال از دستگاه‌های کلاس C می‌توان به چراغ‌های خیابان، کنترل برق و غیره اشاره کرد. این دستگاه‌های همیشه در حال گوش دادن برای دریافت داده به سمت پایین می‌باشند

^۱ synchronize

یا به عبارتی پنجره دریافت آن‌ها همیشه باز می‌باشد (مگر زمانی که در حال ارسال داده به سمت بالا می‌باشند). در نتیجه این دستگاه‌ها کمترین تاخیر در ارتباط سرور با دستگاه انتهایی را دارند.

دستگاه‌های انتهایی کلاس C مانند کلاس A دو پنجره دریافت دارند، با این تفاوت که پنجره دریافت دوم (RX2) را تا زمان ارسال داده بعدی به سرور باز نگه می‌دارند. در نتیجه آن‌ها تقریباً در هر زمانی می‌توانند داده به سمت پایین در پنجره دوم خود دریافت کنند. همچنین یک پنجره ثابت کوتاه مدت بین ارسال داده توسط دستگاه انتهایی و پنجره دریافت اول (RX1) آن‌ها وجود دارد. جزئیات گفته شده در شکل ۲۸-۳ قابل مشاهده می‌باشد.



شکل ۲۸-۳ عملکرد دریافت دستگاه انتهایی کلاس C [14]

جمع بندی

در میان فناوری‌های شبکه موجود برای کاربردهای انترنت اشیاء، دسته از فناوری‌ها به نام فناوری‌های دوربرد کم توان (LPWAN) به طور خاص برای کاربردهای انترنت اشیاء طراحی شده‌اند و از میان آن‌ها فناوری LoRaWAN که یک فناوری متن-باز با ویژگی‌هایی چون برد بالا، مصرف انرژی پایین، هزینه کم، امن و مقیاس پذیر می‌باشد و همچنین از باند فرکانسی بدون مجوز استفاده می‌کند را برای پیاده‌سازی انتخاب کردیم. در این فصل به بررسی دقیق و جزئی فناوری LoRaWAN پرداختیم و با اجزاء شبکه آن

و نحوه عملکرد آن‌ها آشنا شدیم. در فصل بعدی به پیاده‌سازی یک زیرساخت شبکه LoRaWAN با اجزاء ذکر شده خواهیم پرداخت.

فصل چهارم

پیاده‌سازی زیرساخت شبکه LoRaWAN

پیاده‌سازی زیرساخت شبکه LoRaWAN

در فصل سوم با فناوری ارتباطی LoRaWAN و جزئیات فنی و اجزاء تشکیل دهنده آن آشنا شدیم. حال که با اجزاء تشکیل دهنده شبکه LoRaWAN به صورت دقیق آشنا شدیم، به پیاده‌سازی این شبکه و فراهم کردن یک زیرساخت شبکه مبتنی بر LoRa می‌پردازیم. در این فصل با ساخت دستگاه انتهایی مبتنی بر LoRa شروع می‌کنیم، سپس نحوه پیاده‌سازی دروازه LoRaWAN می‌پردازیم. در ادامه با سورورهای TTN شبکه‌ی LoRaWAN که می‌توان از آن‌ها استفاده کرد آشنا می‌شویم و سورور شبکه یا پلتفرم The Things Network را برای زیرساخت خود انتخاب کرده و در مورد آن توضیحات لازم را ارائه می‌دهیم. در نهایت به نحوه استفاده از سورور کاربرد در این پلتفرم پرداخته و نحوه ذخیره‌سازی داده‌های جمع شده و تحلیل آن‌ها را مورد بررسی قرار می‌دهیم.

۱-۴ پیاده‌سازی دستگاه انتهایی شبکه LoRaWAN

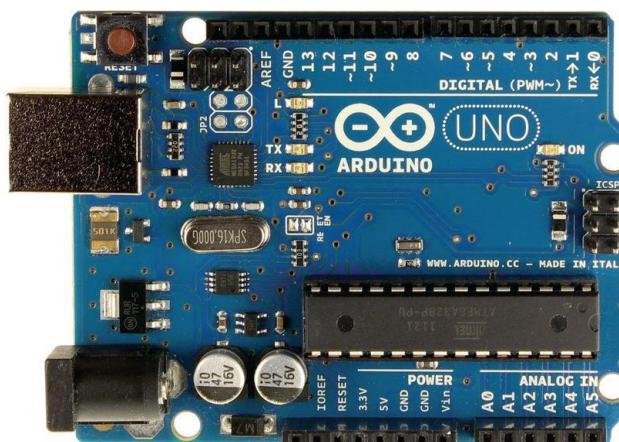
در این بخش می‌خواهیم یک دستگاه انتهایی مبتنی بر LoRa و پردازنده Arduino طراحی و پیاده‌سازی کنیم. ابتدا یک دستگاه انتهایی ساده را جهت تست شبکه پیاده‌سازی می‌کنیم و سپس به طراحی و پیاده‌سازی یک دستگاه انتهایی با کیفیت و مستحکم می‌پردازیم. همانطور که ذکر شد، دستگاه انتهایی در شبکه دارای چند جزء می‌باشد: ۱- پردازنده ۲- مژول رادیویی LoRa که در این پیاده‌سازی ما از مژول HopeRF96 SX1276 استفاده می‌کنیم. ۳- منبع تغذیه ۴- حسگر یا عملگر و یا هردوی آن‌ها از آنجایی که هدف ما در این پروژه ارزیابی ویژگی‌های شبکه LoRa می‌باشد و پیاده‌سازی یک کاربرد خاص مدنظر ما نیست، کلاس دستگاه‌های انتهایی را کلاس A انتخاب کرده (چرا که تنها مشخصات سیگنال دریافت شده در سورور شبکه برای ما اهمیت دارد و نیازی به ارسال داده به سمت پایین برای دستگاه انتهایی نداریم) و همچنین نیازی به استفاده از حسگر و عملگر نیز نداریم چراکه محتوای پیام ارسال شده از دستگاه انتهایی برای ما اهمیت ندارد و تنها ویژگی‌های سیگنال ارسالی و دریافتی برای ما مهم می‌باشد. اما برای مشاهده کارکرد دستگاه‌ها برای تست نهایی در دستگاه نهایی طراحی شده، به پیاده‌سازی کاربرد مکان یاب روی دستگاه انتهایی (با استفاده از مژول GPS NEO-6m) می‌پردازیم.

۴-۱-۱ نسخه اولیه دستگاه انتهایی مبتنی بر LoRa

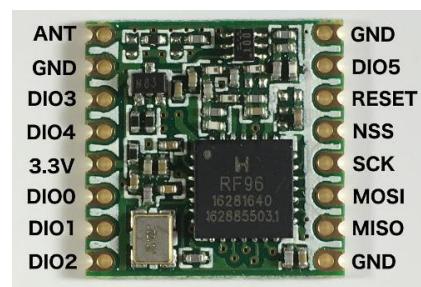
برای طراحی نسخه اولیه دستگاه انتهایی جهت آشنایی با کارکرد شبکه LoRa و بررسی نحوه ارسال پیامها در دستگاه انتهایی از قطعات زیر استفاده کردیم:

- برد Arduino Uno
- ماژول ارتباطی رادیویی LoRa Hope RF96 SX1276
- سیم‌های جامپر جهت اتصال ماژول رادیویی به پردازنده
- برای تغذیه نسخه اولیه از کابل Type B و اتصال برد به کامپیوتر استفاده کردیم

در شکل‌های ۱-۴ و ۲-۴ به ترتیب برد Arduino Uno و ماژول رادیویی RF96 را مشاهده می‌کنید.



شکل ۱-۴ برد



شکل ۲-۴ ماژول رادیویی

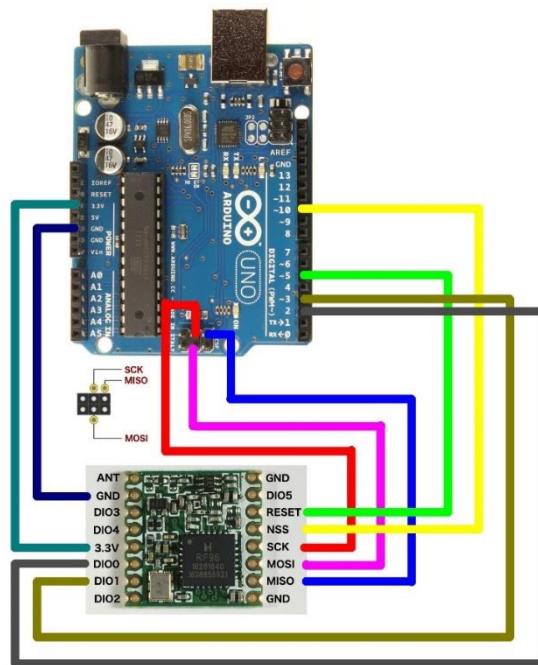
برد Arduino و مژول رادیویی برای ارتباط از پروتکل (SPI Serial Peripheral Interface) استفاده می‌کند که این پروتکل دارای ۴ پایه اصلی می‌باشد:

- پایه (MOSI Master out Slave in) که اطلاعات از دستگاه Master که در اینجا Arduino می‌باشد به Slave که برد رادیویی است انتقال می‌یابد
- پایه (MISO Master in Slave out) که جریان انتقال اطلاعات بر عکس MOSI را برقرار می‌کند
- پایه (NSS Slave Select) که در صورت وجود چند دستگاه جانبی از بین آن‌ها انتخاب را انجام می‌دهد
- و پایه (SCK Serial Clock) که نقش همگام‌سازی را با ارسال سیگنال ساعت از آردوینو به مژول رادیویی انجام می‌دهد.

علاوه بر پایه‌های ذکر شده در بالا در RF96 چند پایه دیگر مورد استفاده قرار می‌گیرد:

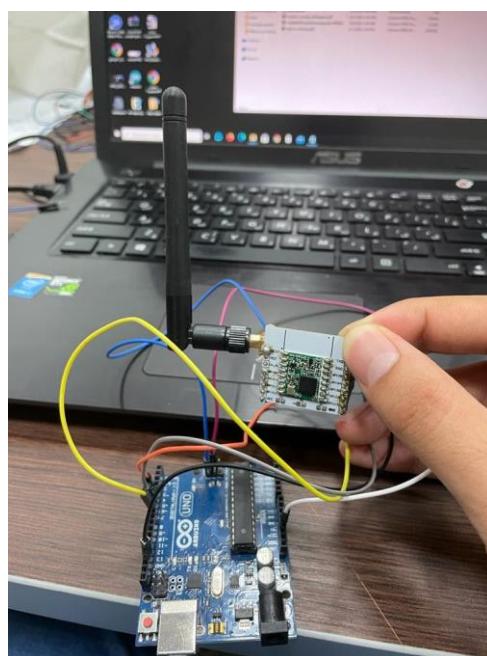
- پایه (ANT) که آتن به آن متصل می‌شود
- پایه (GND) که به زمین متصل می‌شود
- پایه (3.3V) که به منبع تغذیه متصل می‌شود
- پایه (DIO Digital Input/Output) برای ورودی و خروجی‌های دیجیتال

حال با توجه به توضیحات بالا و با توجه به نقشه اتصال در شکل ۳-۴ برد Arduino را به مژول رادیویی متصل می‌کنیم.



[16] نقشه اتصالات برد RF96 به مازول رادیویی Arduino

با توجه به نقشه اتصالات به پیاده‌سازی این دستگاه انتهایی می‌پردازیم و در شکل ۴-۴ دستگاه ساخته شده را مشاهده می‌کنید.



شکل ۴-۴ نسخه اولیه دستگاه انتهایی مبتنی بر LoRa

پس از اتصال قطعات دستگاه انتهایی نیاز به برنامه‌نویسی آن جهت عملکرد درست به عنوان دستگاه انتهایی LoRaWAN داریم. برای این کار از کتابخانه LMIC در آردوینو استفاده می‌کنیم. این کتابخانه امکان فعالسازی یک دستگاه انتهایی مبتنی بر LoRa را برای ما فراهم می‌کند.

چند نکته کلیدی در مورد این کتابخانه و تغییراتی که باید در آن بدھیم را در ادامه ذکر خواهیم کرد.

در فایل Config.h از کتابخانه LMIC باید چند خط از کد را از حالت نظر^۱ خارج کرده و برای بررسی خطای راحت تر خط کدی که اطلاعات را در نمایشگر سریال برد Arduino چاپ می‌کند، فعال کنیم. همچنین این کتابخانه به صورت پیش فرض روی فرکانس کاری ۸۶۸ مگاهرتز کار می‌کند و باید آن را به ۹۱۵ مگاهرتز تغییر دهیم. تغییرات ذکر شده در شکل ۴-۵ قابل مشاهده می‌باشد.

```

config.h
8 // #define CFG_eu868_1 To change frequency plan from 868 Mhz to 915 Mhz
9 #define CFG_us915_1
10 // This is the SX1272/SX1273 radio, which is also used on the HopeRF
11 // RFM92 boards.
12 // #define CFG_sx1272_radio_1
13 // This is the SX1276/SX1277/SX1278/SX1279 radio, which is also used on
14 // the HopeRF RFM95 boards.
15 #define CFG_sx1276_radio_1
16
17 // 16 µs per tick
18 // LMIC requires ticks to be 15.5µs - 100 µs long
19 #define US_PER_OSTICK_EXPONENT 4
20 #define US_PER_OSTICK (1 << US_PER_OSTICK_EXPONENT)
21 #define OSTICKS_PER_SEC (1000000 / US_PER_OSTICK)
22
23 // Set this to 1 to enable some basic debug output (using printf) about
24 // RF settings used during transmission and reception. Set to 2 to
25 // enable more verbose output. Make sure that printf is actually
26 // configured (e.g. on AVR it is not by default), otherwise using it can
27 // cause crashing.
28 #define LMIC_DEBUG_LEVEL 2
29
30 // Enable this to allow using printf() to print to the given serial port
31 // (or any other Print object). This can be easy for debugging. The
32 // current implementation only works on AVR, though.
33 #define LMIC_PRINTF_TO Serial For debuggin
34
35 // Any runtime assertion failures are printed to this serial port (or
36 // any other Print object). If this is unset, any failures just silently
37 // halt execution.
38 #define LMIC_FAILURE_TO Serial
39
40 // Uncomment this to disable all code related to joining
41 // #define DISABLE_JOIN
42 // Uncomment this to disable all code related to ping
43 #define DISABLE_PING
44 // Uncomment this to disable all code related to beacon tracking.
45 // Requires ping to be disabled too
46 #define DISABLE_BEACONS
47

```

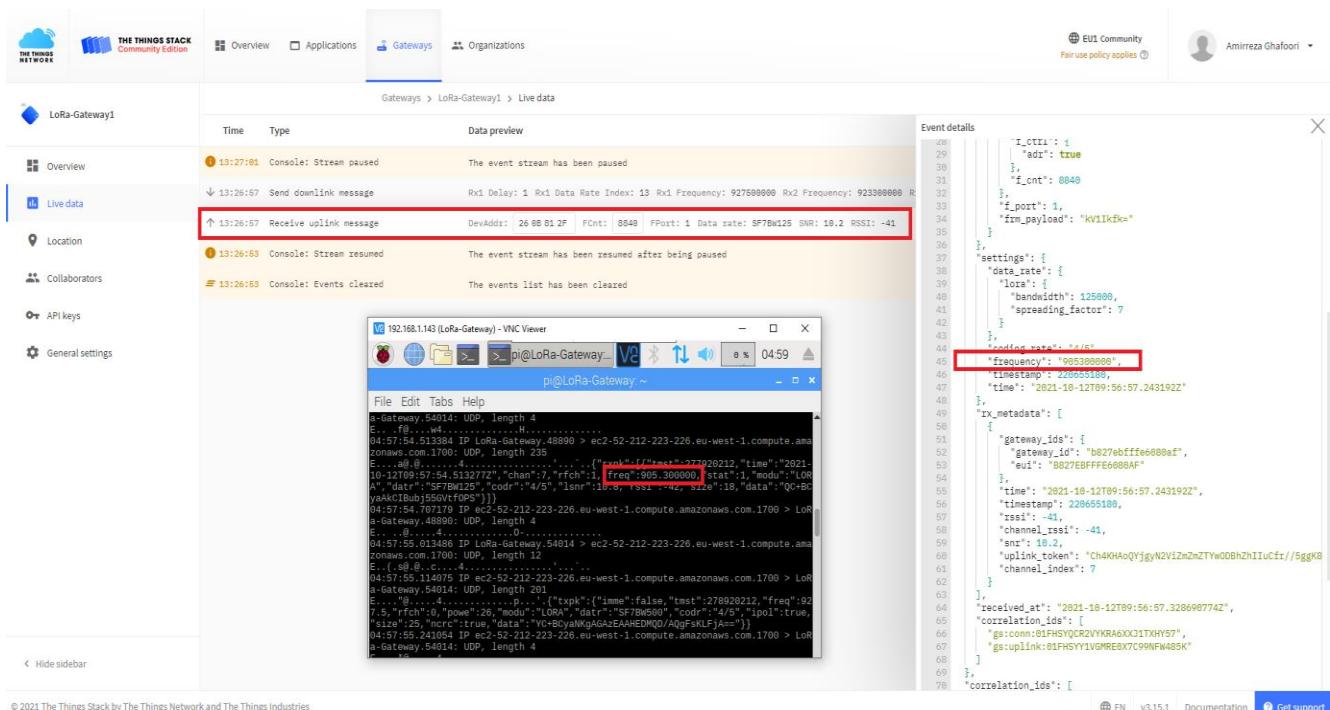
C++ source file

شکل ۴-۵ تغییرات لازم در فایل config.h از کتابخانه LMIC

^۱ Comment

نکته مهم در مورد دستگاه انتهایی که با این کتابخانه کار می‌کند این است که این برنامه طوری تنظیم شده است که دستگاه انتهایی از تکنیک پرش کanal^۲ استفاده می‌کند و برای هر بار ارسال فرکانس خود را از فرکانس پایه ۲۰۰ هزار افزایش می‌دهد. این عمل ۵ بار تکرار می‌شود و سپس دوباره از فرکانس پایه شروع به ارسال می‌کند و این حلقه ادامه دارد. این امر باعث می‌شود که احتمال تداخل سیگنال‌های دستگاه‌های انتهایی بسیار کاهش یابد و در نتیجه بسته‌ها با موفقیت به مقصد (دروازه‌ها) برسند.

پس از برنامه ریزی دستگاه و اتمام پیکربندی آن، آن را روشن کرده و تست می‌کنیم. در شکل ۴-۶ بسته‌های دریافت شده از این دستگاه انتهایی در سرور شبکه را می‌توان مشاهده کرد. همچنین ارسال بسته در نمایشگر سریال آردوبینو و دریافت بسته در دروازه را در این شکل می‌توان دید (بسته‌ها ابتدا به دروازه رسیده و سپس به سرور شبکه ارسال می‌شوند، و جزئیات دروازه و سرور شبکه در بخش‌های بعدی توضیح داده می‌شود).



شکل ۶-۴ ارسال پسته از نسخه اولیه دستگاه انتهاپی و دریافت آن در دروازه و سرور شبکه

² Channel hopping

حال که نسخه اولیه دستگاه انتهایی را راه اندازی کردیم و آن را تست کردیم، به بررسی معایب این نسخه می‌پردازیم:

۱. برد Arduino Uno نسبت به دیگر بردهای Arduino مصرف انرژی بالایی دارد که این برد را برای استفاده از باتری نامناسب می‌سازد (مصرف بالایی که از آن استفاده نمی‌شود و ضروری نیست)
۲. اندازه برد Arduino Uno برای طراحی یک دستگاه انتهایی مناسب نیست و بزرگ می‌باشد
۳. هزینه خرید برد Arduino Uno به نسبت دیگر بردهای Arduino بالا می‌باشد
۴. استفاده از سیم‌های جامپر برای برقراری اتصالات احتمال ایجاد قطعی در اتصالات را افزایش می‌دهد
۵. استفاده از سیم جامپر باعث ایجاد نویز می‌شود که می‌تواند برای سیگنال بی‌سیم مزاحمت ایجاد کند
۶. نسخه طراحی شده دستگاه انتهایی مستحکم و یکپارچه نیست و نمی‌توان به راحتی آن را در جایی قرار داد و یا حمل کرد

با توجه به معایب ذکر شده در بالا، در صدد رفع آن‌ها و طراحی یک دستگاه انتهایی مناسب و با کیفیت به طراحی و پیاده‌سازی نسخه دوم دستگاه انتهایی می‌پردازیم.

۲-۱-۴ نسخه دوم دستگاه انتهایی مبتنی بر LoRa

با توجه به معایبی که نسخه اولیه دستگاه انتهایی ساخته شده داشت، حال به طراحی و ساخت نسخه دوم دستگاه انتهایی می‌پردازیم. ابتدا به معرفی قطعاتی که در این دستگاه مورد استفاده قرار می‌گیرد می‌پردازیم.

- برد Arduino Pro Mini
- مازول رادیویی LoRa Hope RF96 SX1276
- باتری قابل شارژ با ظرفیت ۱۰۰۰ میلی آمپر ساعت
- رابط آنتن SMA
- آنتن SMA برای فرکانس ۹۱۵ مگاهرتز

علاوه بر موارد ذکر شده در بالا، برای استحکام دستگاه، حذف سیم‌های جامپر (در نتیجه برطرف شدن مشکل امکان قطعی اتصالات و نویز سیم‌های جامپر) و یکپارچکی دستگاه انتهایی به طراحی و چاپ³ PCB برای این دستگاه می‌پردازیم. در شکل ۷-۴ PCB چاپ شده برای دستگاه انتهایی را مشاهده می‌کنید [16].



شکل ۷-۴ PCB چاپ شده برای دستگاه انتهایی نسخه دوم

حال به بررسی قطعات می‌پردازیم. برد Arduino Pro Mini علاوه بر سایز بسیار کوچکی که دارد (نسب به برد Arduino Uno)، مصرف انرژی آن هم به مراتب پایین تر از Arduino Uno می‌باشد. در شکل ۸-۴ Arduino Pro جریان مصرفی بردۀای آردوینو با هم مقایسه شده است و همانطور که مشهود است برد Arduino Pro کمترین جریان مصرفی را در میان بردۀای آردوینو دارد.

³ Printed Circuit Board (PCB)

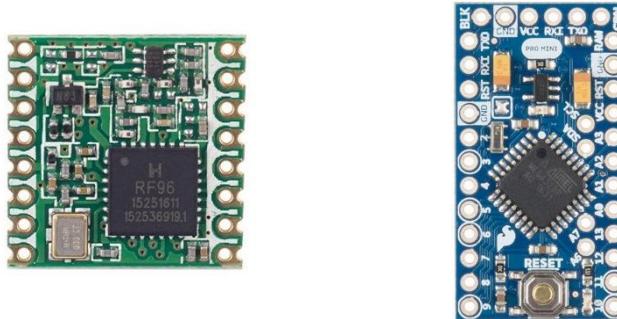
Microcontroller	Reference 9V	Reduce Clock Speed 9V	Reduce Clock Speed and Operation Voltage 3.3V	Enable Low Power Mode 3.3V	Enable Low Power Mode 9V
Arduino Nano	22.1 mA	18.5 mA (-16%)	3.4 mA (-85%)	3.4 mA (-84%)	4.8 mA (-78%)
Arduino Pro Mini 5V	14.6 mA	10.0 mA (-32%)	3.7 mA (-75%)	1.6 mA (-89%)	3.2 mA (-78%)
Arduino Pro Mini 3.3V	5.1 mA	3.8 mA (-25%)	3.7 mA (-27%)	1.6 mA (-69%)	3.2 mA (-38%)
Arduino Uno	98.4 mA	42.8 mA (-57%)	11.6 mA (-88%)	11.5 mA (-88%)	27.9 mA (-72%)
Arduino Mega	73.2 mA	61.8 mA (-16%)	16.7 mA (-77%)	11.9 mA (-84%)	26.9 mA (-63%)

شکل ۸-۴ بررسی جریان مصرفی برد های آردوینو [30]



شکل ۹-۴ مقایسه ابعاد برد Arduino Uno و Arduino Pro mini

در مورد ماثول رادیویی RF96 در بخش نسخه اولیه دستگاه انتهایی توضیح داده شد. در شکل ۱۰-۴ ماثول رادیویی RF96 با فرکانس ۹۱۵ مگاهرتز که در دستگاه نسخه دوم استفاده خواهیم کرد به همراه برد Arduino Pro Mini قابل مشاهده می باشد.



شکل ۱۰-۴ برد RF96 در سمت راست و مژول رادیویی RF96 در سمت چپ

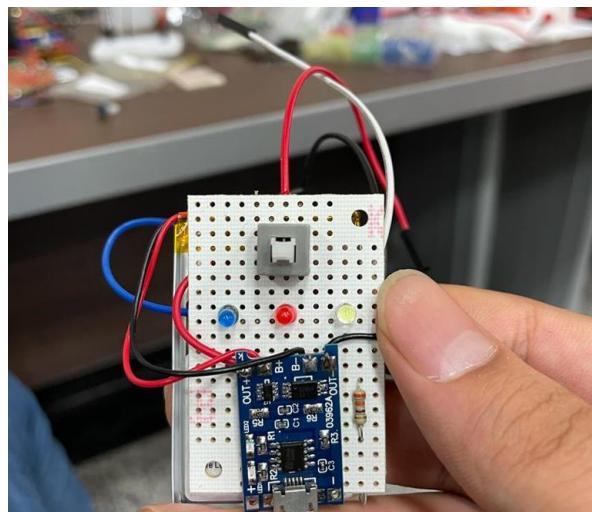
در شکل ۱۱-۴ باتری‌های قابل شارژ با ظرفیت ۱۰۰۰ میلی آمپر ساعت و ۲۰۰۰ میلی آمپر ساعت مشاهده می‌شوند.



شکل ۱۱-۴ باتری قابل شارژ Sonikcell با ظرفیت ۱۰۰۰ میلی آمپر ساعت (سمت راست) و ۲۰۰۰ میلی آمپر ساعت (سمت چپ)

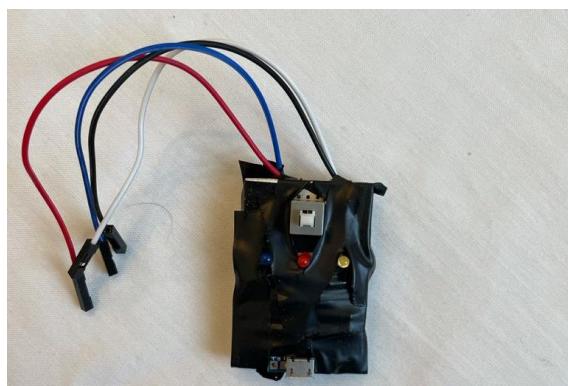
از آنجایی که می‌خواهیم ابعاد دستگاه کوچک باشد و همچنین دستگاه انتهايی LoRa مصرف جريان بالاي ندارد از باتری با ظرفیت ۱۰۰۰ میلی آمپر ساعت استفاده می‌کنيم. برای اينکه از اين باتری قابل شارژ در دستگاه انتهايی استفاده کنيم، به طراحي يك برد مژول تغذيه پرداختيم که در ادامه جزئيات آن را بيان می‌کنيم.

برای ساخت مژول تغذیه از باتری ۱۰۰۰ میلی آمپر ساعت، مژول شارژر TP4056، ۳ چراغ ال ای دی^۴ کوچک به رنگ‌های آبی، سفید و قرمز، مقاومت‌های ۳۳۰ اهم و دکمه^۵ ۶ پایه استفاده می‌کنیم. با متصل کردن این قطعات روی یک برد خام مژول تغذیه را می‌سازیم که قابلیت شارژ مجدد را با کابل Micro USB دارد. در شکل ۱۲-۴ مژول تغذیه را مشاهده می‌کنید.



شکل ۱۲-۴ قطعات مژول تغذیه

در شکل ۱۳-۴ نیز نمونه تمام شده مژول تغذیه را مشاهده می‌کنید.



شکل ۱۳-۴ مژول تغذیه ۱۰۰۰ میلی آمپر ساعت

⁴ LED

⁵ Switch

با فشردن دکمه این ماژول، ال ای دی قرمز روشن می‌شود که نشانگر وصل شدن جریان باتری می‌باشد. با وصل کردن این ماژول به دستگاه انتهایی، هنگام ارسال داده از دستگاه انتهایی ال ای دی آبی به مدت ۲ ثانیه روشن می‌شود و همچنین هنگام دریافت داده توسط دستگاه انتهایی ال ای دی سفید به مدت ۲ ثانیه روشن خواهد شد.

در شکل ۱۴-۴ دو آنتن بزرگ و کوچک در فرکانس کاری ۹۱۵ مگاهرتز را مشاهده می‌کنید.



شکل ۱۴-۴ آنتن‌های ۹۱۵ مگاهرتز در سایز کوچک و بزرگ

حال که با قطعات به صورت جدا آشنا شدیم، به اتصال آنها روی برد PCB می‌پردازیم. در شکل ۱۵-۴ نمونه لحیم شده دستگاه انتهایی را مشاهده می‌کنید.



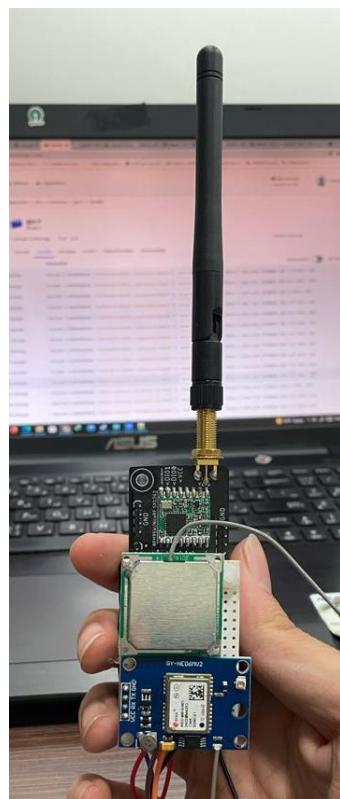
شکل ۱۵-۴ دستگاه انتهایی نسخه دوم

در شکل بالا رابط آنتن نیز با رنگ طلایی مشهود است. پس از اتمام اتصالات مازول تغذیه را به دستگاه انتهایی می‌چسبانیم و پایه‌های آن را متصل می‌کنیم. در شکل ۱۶-۴ نمونه تمام شده دستگاه انتهایی (از کنار) را مشاهده می‌کنید.



شکل ۱۶-۴ دستگاه انتهایی نسخه دوم به همراه مازول تغذیه

در ادامه برای نمونه، کاربرد مکان یاب را با استفاده از مازول GPS NEO-6m روی دستگاه انتهایی پیاده می‌کردیم. در شکل ۱۷-۴ دستگاه انتهایی مجهز به GPS قابل مشاهده می‌باشد.



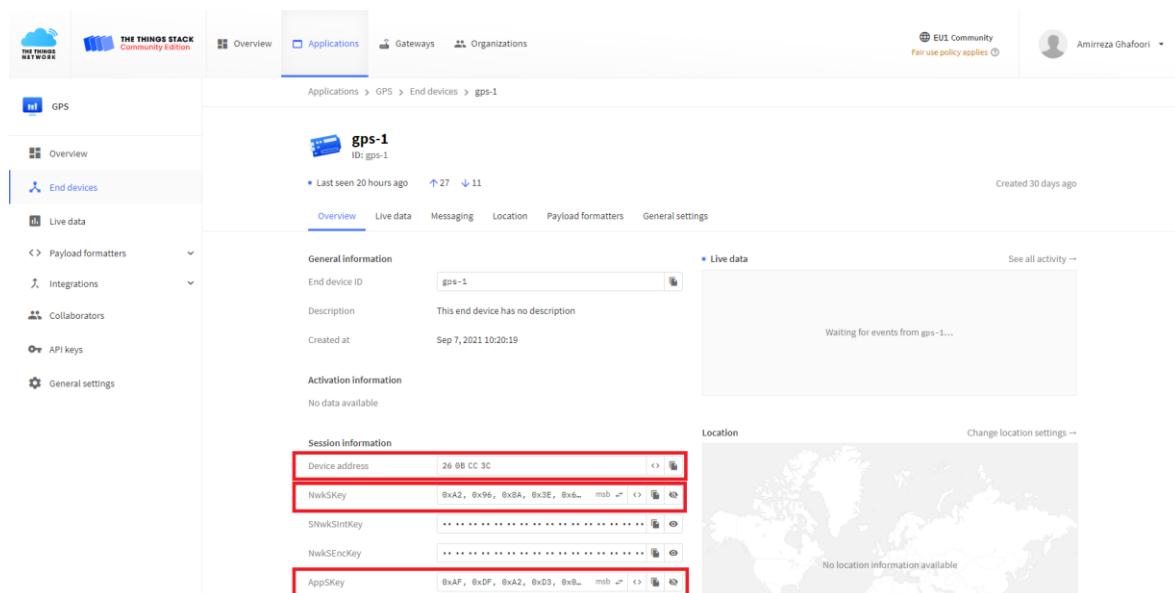
شکل ۱۷-۴ دستگاه انتهایی نسخه دوم مجهز به GPS

دستگاه انتهایی نسخه دوم یک طراحی مازولار دارد و به راحتی می‌توان کاربردهای مختلف را بر روی آن پیاده‌سازی و جدا کرد. همچنین منبع تغذیه آن قابلیت جداسازی و نصب راحت دارد. از طرفی با پیاده‌سازی دستگاه انتهایی روی یک PCB واحد، ساختار دستگاه یکپارچه شده است و امکان حمل کردن آن بسیار راحت می‌باشد. علاوه بر این‌ها ابعاد آن و همچنین انرژی مصرفی آن نسبت به نسخه اولیه به صورت چشمگیری کاهش یافته است. این دستگاه انتهایی به عنوان دستگاه انتهایی در شبکه LoRaWAN و برای ارزیابی این شبکه مورد استفاده قرار خواهد گرفت.

۳-۱-۴ راه اندازی دستگاه انتهایی

تا به اینجا ساخت افزار دستگاه انتهایی تکمیل شد. حال به بررسی کد برنامه نویسی شده در Arduino Pro Mini و تغییراتی که در آن باید اعمال شود می‌پردازیم. همانطور که در فصل قبل توضیح داده شد، دستگاه انتهایی در شبکه LoRaWAN به یکی از دو روش OTAA یا ABP راه اندازی می‌شود. فرآیند راهاندازی دستگاه با OTAA امنیت سیستم را افزایش می‌دهد، اما پیچیدگی سیستم و همچنین زمان آماده شدن

دستگاه انتهایی را افزایش می‌دهد. در این پروژه به منظور جلوگیری از پیچیدگی اضافی و با توجه به اینکه پیام‌های ارسالی توسط دستگاه انتهایی محتوایی ندارند و هدف بررسی ارزیابی شبکه و بررسی مشخصات سیگنال‌ها می‌باشد، از روش ABP برای راهاندازی دستگاه انتهایی استفاده می‌کنیم. برای استفاده از روش ABP باید کلیدهای جلسه شبکه و جلسه کاربرد را از پلتفرم TTN استخراج کرده (در بخش پیاده‌سازی سرور شبکه و کاربرد توضیحات فعالسازی دستگاه در شبکه داده خواهد شد)، و در کد دستگاه انتهایی قرار دهیم. همچنین آدرس دستگاه را باید مطابق آدرس موجود در سرور شبکه تغییر دهیم تا دستگاه انتهایی توسط سرور شبکه احراز هویت شود و داده‌های آن دریافت شود. در شکل ۱۸-۴ کلیدها و آدرس گفته شده را در پلتفرم TTN و در شکل ۱۹-۴ محل قرار گرفتن آن‌ها در کد دستگاه انتهایی را مشاهده می‌کنید.



شکل ۱۸-۴ کلید جلسه سرور و جلسه کاربرد و آدرس دستگاه در پلتفرم TTN

```

gps-1

/*
 * To use this sketch, first register your application and device with
 * the things network, to set or generate a DevAddr, NWksKey and
 * AppSKey. Each device should have their own unique values for these
 * fields.
 *
 * Do not forget to define the radio type correctly in config.h.
 */

#include <lmic.h>
#include <hal/hal.h>
#include <SPI.h>

// LoRaWAN NWksKey, network session key
// This is the default Semtech key, which is used by the early prototype TTN
// NWKSKEY
static const PROGMEM u1_t NWKSKEY[16] = {0xAF, 0x96, 0x8A, 0x3E, 0x66, 0xB6, 0x86, 0x22, 0xB7, 0xED, 0x78, 0x38, 0x96, 0xF7, 0x6C, 0x6F};

// LoRaWAN AppSKey, application session key
// This is the default Semtech key, which is used by the early prototype TTN
// APPSKEY
static const u1_t PROGMEM APPSKEY[16] = {0xAF, 0xDF, 0xA2, 0xD3, 0x05, 0x5E, 0x4C, 0x39, 0x29, 0x78, 0x2E, 0x37, 0x22, 0x8D, 0x84, 0xCE};

// LoRaWAN end-device address (DevAddr)
static const u4_t DEVADDR = 0x260BC3C; // --> Change this address for every node!

// These callbacks are only used in over-the-air activation, so they are
// left empty here (we cannot leave them out completely unless
// DISABLE_JOIN is set in config.h, otherwise the linker will complain).
void os_getArtEui(u1_t* buf) { }
void os_getDevEui(u1_t* buf) { }
void os_getDevKey(u1_t* buf) { }


```

شکل ۱۹-۴ محل قرارگیری کلید جلسه سرور و جلسه کاربرد و آدرس دستگاه در کد Arduino

پس از انجام این کار، با روشن کردن دستگاه و ارسال داده از سمت آن، در صورت دریافت داده به صورت سالم در دروازه LoRaWAN، در سرور شبکه و سرور کاربرد قادر به مشاهده داده ارسال شده توسط دستگاه انتهایی خواهیم بود. کد کامل دستگاه انتهایی در پیوست این پایان‌نامه قرار داده شده است. در بخش بعد به بررسی نحوه پیاده‌سازی دروازه شبکه LoRaWAN خواهیم پرداخت.

۲-۴ پیاده‌سازی دروازه شبکه LoRaWAN

قسمت بعدی که قصد پیاده‌سازی آن را داریم دروازه شبکه LoRaWAN می‌باشد. دروازه در زیر ساخت نقش اساسی دارد و ارسال کننده پیام دستگاه‌های انتهایی به سمت سرور شبکه می‌باشد. دروازه‌های شبکه LoRaWAN به دو دسته کلی دروازه‌های تک کاناله^۶ و دروازه‌های چند کاناله^۷ تقسیم می‌شوند. در شکل ۲۰-۴ دو نمونه دروازه صنعتی LoRaWAN را مشاهده می‌کنید.

⁶ Single-channel gateway

⁷ Multi-channel gateway



شکل ۲۰-۴ دروازه‌های شبکه LoRaWAN

برای ساخت دروازه شبکه LoRa به یک سخت افزار که امکان اجرای سیستم عامل داشته باشد احتیاج داریم. برای مورد کار از یک کامپیوتر کوچک Raspberry pi استفاده می‌کیم. سپس برنامه دروازه LoRaWAN در به صورت پس‌زمینه در سیستم عامل اجرا می‌شود و سرویس دروازه را ارائه می‌دهد.

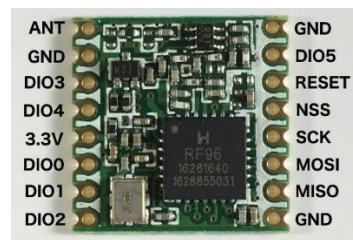
علاوه بر سخت افزار ذکر شده، به ماژول رادیویی LoRaWAN که نقش دریافت و ارسال سیگنال‌های رادیویی بین دروازه و دستگاه‌های انتهایی را بر عهده دارد نیاز خواهیم داشت. همانطور که گفته شد دروازه‌ها به دو دسته کلی تک کاناله و چند کاناله تقسیم می‌شوند که در ادامه با جزئیات آن‌ها آشنا خواهیم شد.

۱-۲-۴ دروازه تک کاناله LoRaWAN

برای ساخت دروازه تک کاناله از یک کامپیوتر کوچک Raspberry pi و یک ماژول رادیویی LoRa Hope⁸ مانند دستگاه انتهایی استفاده می‌کنیم. Raspberry pi دارای پایه‌های ورودی/خروجی^۸ می‌باشد که می‌توان ماژول رادیویی را از طریق آن‌ها به آن متصل نمود. برای راهاندازی برنامه دروازه تک کاناله برنامه single_chan_pkt_fwd را روی آن اجرا می‌کنیم [15]. همانطور که گفته شد این برنامه به صورت پس زمینه روی دروازه در زمان روشن شدن، شروع به کار می‌کند. در شکل ۲۱-۴ یک کامپیوتر کوچک Raspberry pi ۳ نمایش داده شده است. همچنین در شکل ۲۲-۴ ماژول رادیویی LoRa مورد استفاده در دروازه تک کاناله را مشاهده می‌کنید.



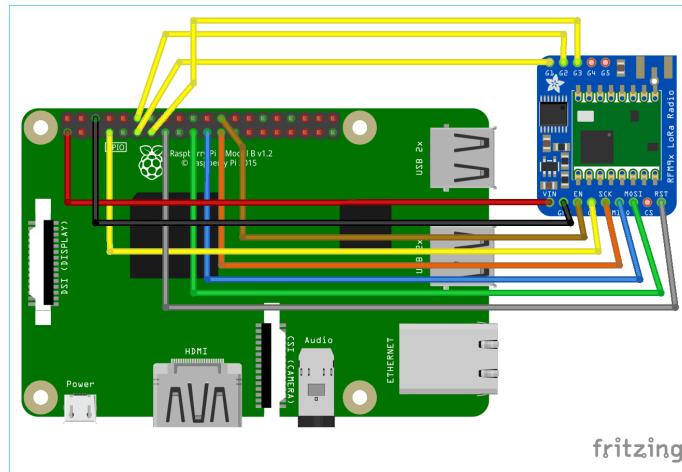
شکل ۲۱-۴ Raspberry pi ۳



شکل ۲۲-۴ ماژول رادیویی Hope RF96

⁸ General Purpose Input/Output (GPIO)

در شکل ۲۳-۴ نحوه متصل کردن مژول رادیویی به Raspberry pi نمایش داده شده است.

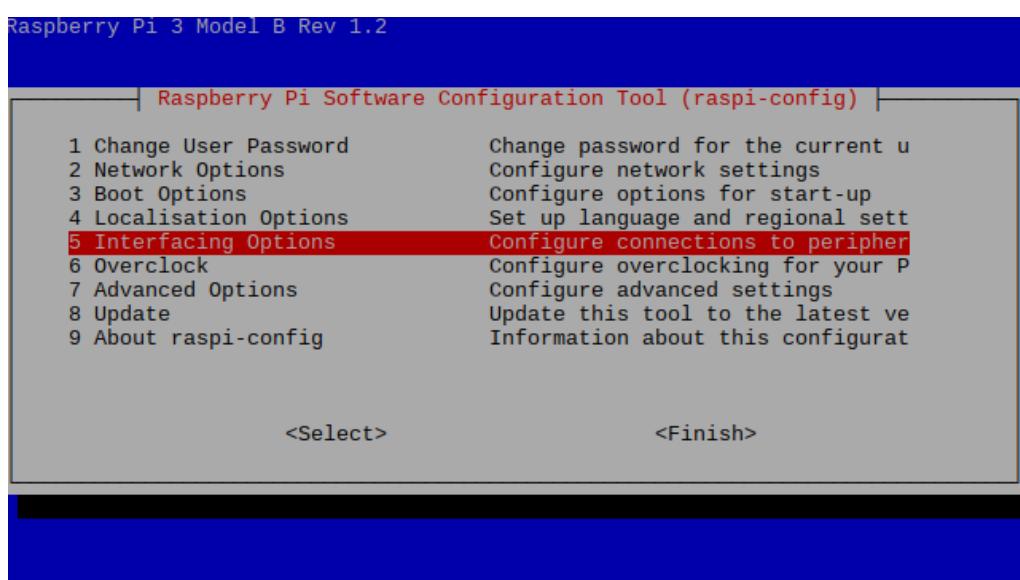


شکل ۲۳-۴ نحوه متصل کردن مژول رادیویی LoRa به پایه‌های Raspberry pi [31]

همچنین برای برقراری ارتباط میان Raspberry pi و مژول رادیویی باید پایه‌های SPI را در Raspberry pi فعال کنیم. برای این کار به بخش ترمینال دستگاه رفته و دستور زیر را وارد می‌کنیم و سپس مطابق شکل‌های ۲۴-۴ تا ۲۷-۴ عمل می‌کنیم تا پروتکل SPI روی Raspberry pi فعال شود.

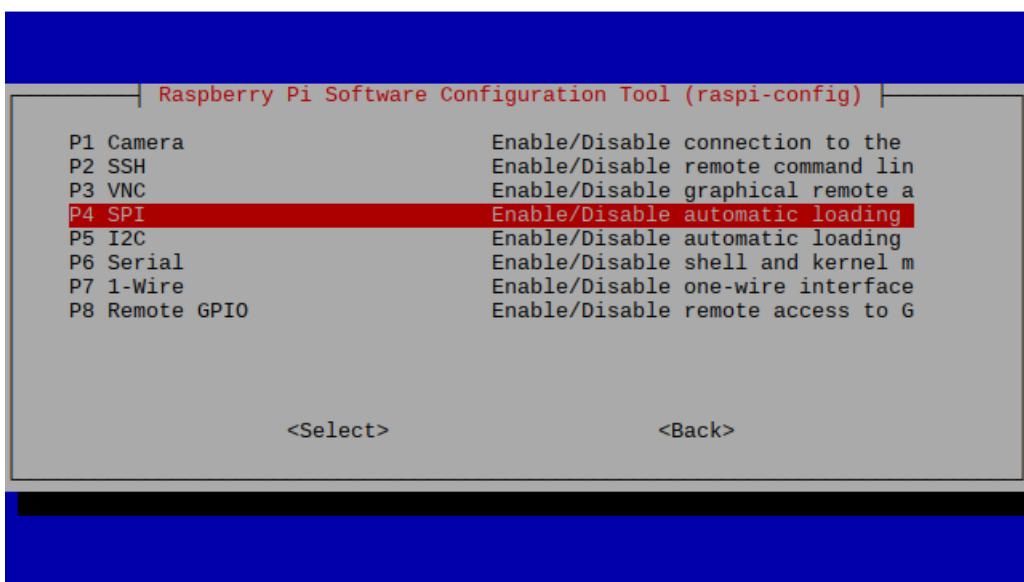
- sudo raspi-config

با زدن این دستور پنجره زیر باز می‌شود:



شکل ۲۴-۴ محیط پیکربندی Raspberry pi

در پنجره باز شده قسمت Interfacing Options را انتخاب می‌کنیم تا وارد پنجره زیر شویم:

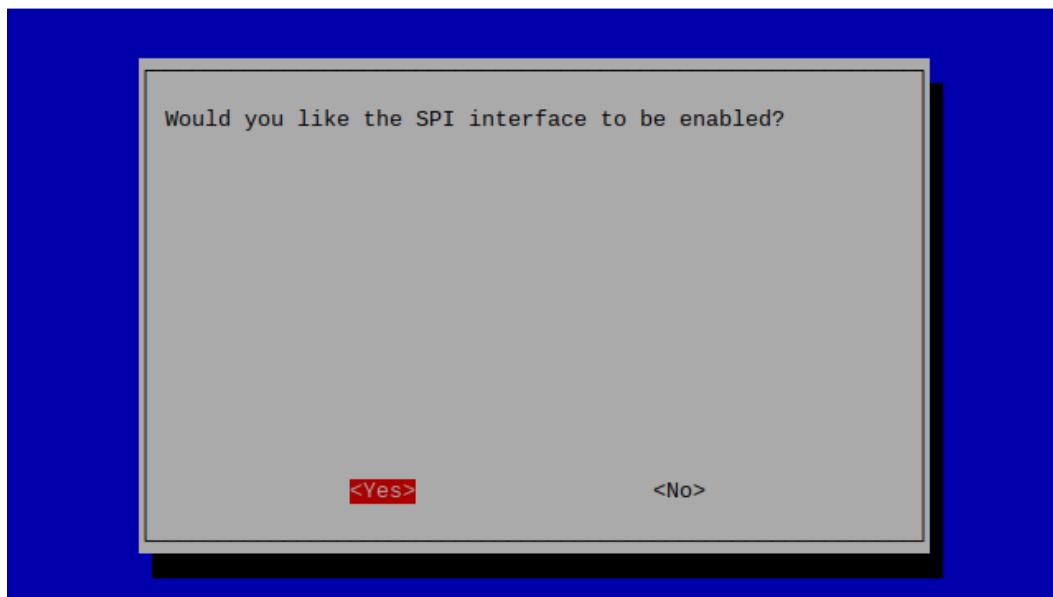


شکل ۴-۲۵ پنجره رابطه‌ای^۹

در این پنجره گزینه SPI را انتخاب کرده و آن را مطابق شکل زیر فعال^{۱۰} می‌سازیم:

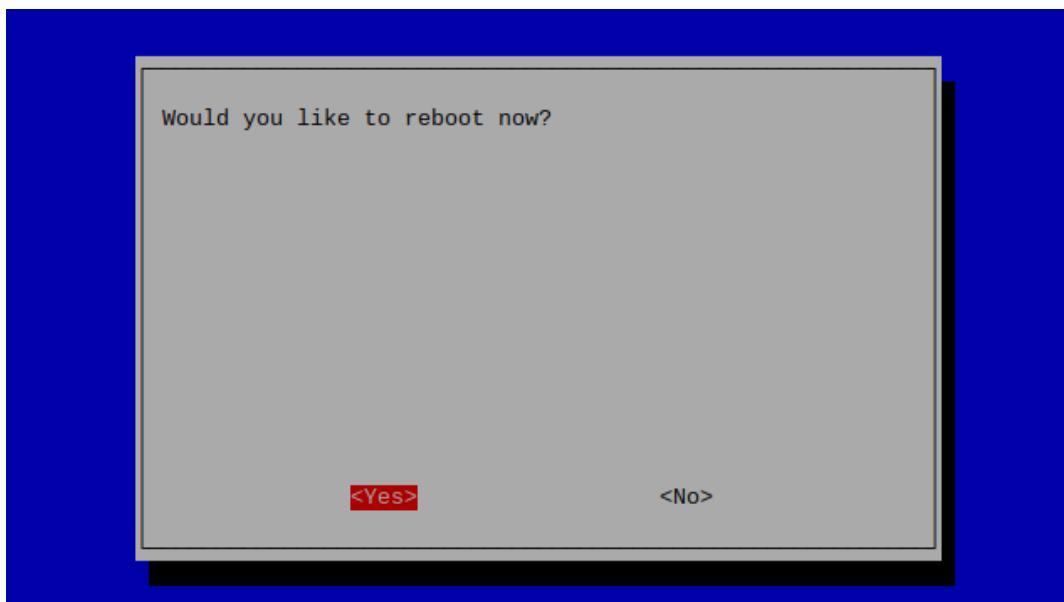
⁹ Interfaces

¹⁰ Enable



شکل ۴-۲۶ فعال‌سازی رابط جانبی سریال^{۱۱}

پس از انجام این کار دستگاه دستور reboot می‌دهد و آن را قبول می‌کنیم:



شکل ۴-۲۷ درخواست reboot شدن دستگاه

¹¹ Serial peripheral interface

حال Raspberry pi می‌تواند با ماژول رادیویی ارتباط برقرار کند و با reboot شدن دستگاه، کار آن به عنوان دروازه تک کاناله انجام می‌شود.

باید توجه داشت که ارتباط Raspberry pi با سرور شبکه از طریق شبکه اینترنت^{۱۲} انجام می‌شود. لذا باید Raspberry pi را به اینترنت متصل کرد. برای این کار یا باید از شبکه WiFi و یا از کابل Ethernet استفاده کنیم. با اتصال کابل Ethernet دستگاه خود به خود در هنگام روشن شدن به اینترنت متصل می‌شود. اما برای اتصال خودکار به شبکه WiFi باید اطلاعات مربوط به شبکه WiFi شامل شناسه سرویس^{۱۳} شبکه و wpa_supplicant.conf رمز^{۱۴} آن را از قبل بر روی Raspberry pi ثبت کنیم. این کار را در فایلی به نام wpa_supplicant.conf انجام می‌دهیم. با دستور زیر می‌توانیم به این فایل دسترسی پیدا کنیم:

- sudo nano/etc/wpa_supplicant/wpa_supplicant.conf

و سپس اطلاعات ذکر شده را با قالب زیر در آن ثبت می‌کنیم:

```
network={  
    ssid="Wifi network name (SSID)"  
    psk="Wifi password"  
}
```

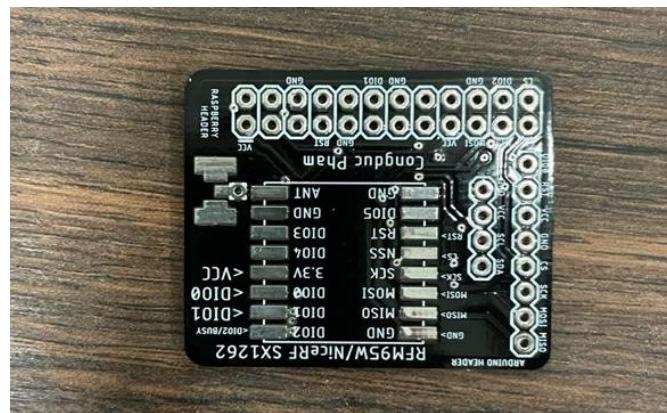
با انجام این کار، Raspberry pi به محض روشن شدن و در صورت در دسترس بودن شبکه WiFi که برای آن تعریف کردیم، به آن وصل می‌شود.

برای یکپارچگی دروازه و عدم ایجاد قطعی در اتصالات، به جای استفاده از سیم‌های جامپر برای اتصال ماژول رادیویی به Raspberry pi، یک PCB چاپ می‌کنیم. در شکل ۲۸-۴ PCB چاپ شده برای دروازه تک کاناله را مشاهده می‌کنید.

¹² Internet network

¹³ Service set identifier (SSID)

¹⁴ Password



شکل ۴-۲۸ PCB چاپ شده برای اتصال مژول رادیویی RF96 به pi

سپس مژول رادیویی را روی این PCB لحیم کرده و آن را روی Raspberry pi قرار می‌دهیم. در شکل ۴-۲۹ یک دروازه تک کاناله کامل شده را مشاهده می‌کنید.



شکل ۴-۲۹ دروازه تک کاناله LoRaWAN

دوازه تک کاناله در پیاده‌سازی واقعی کاربردی ندارد و تنها مزیت آن هزینه پایین پیاده‌سازی آن می‌باشد. از آنجایی که این دروازه تنها قادر است پیام‌ها را تنها در یک کانال خاص با فرکانس ثابت دریافت کند، و دستگاه‌های انتهایی ما از تکنیک پرش کانال استفاده می‌کنند، این دروازه قادر به دریافت تنها یک پنجم از

کل پیام‌های ارسالی دستگاه انتهایی ما خواهد بود. لذا برای این پروژه از این دروازه استفاده نخواهیم کرد. در ادامه به نحوه پیاده‌سازی دروازه چند کاناله LoRaWAN خواهیم پرداخت.

۲-۲-۴ پیاده‌سازی دروازه چند کاناله LoRaWAN

همانطور که گفته شد، دروازه تک کاناله LoRaWAN در عمل کارایی ندارد و تنها قادر به دریافت اطلاعات روی یک فرکانس خاص و یک کanal خاص می‌باشد و تنها مزیت آن هزینه پایین‌ماژول رادیویی نسب به ماژول‌های چند کاناله می‌باشد. ما در این پروژه به پیاده‌سازی دروازه‌های چند کاناله (۸ کاناله) پرداخته‌ایم.

برای پیاده‌سازی یک دروازه چند کاناله، مانند دروازه تک کاناله به یک کامپیوتر کوچک Raspberry pi و یک ماژول فرستنده-گیرنده^{۱۵} LoRa نیاز داریم، با این تفاوت که ماژول فرستنده-گیرنده ما این بار به جای تک کاناله بودن یک ماژول ۸ کاناله خواهد بود. همانطور که در فصل قبل گفته شد، دروازه‌های شبکه LoRaWAN می‌توانند دارای فرستنده-گیرنده ۸ کاناله، ۱۶ کاناله و یا ۶۴ کاناله باشند. در این پروژه ما از فرستنده-گیرنده ۸ کاناله RAK831 استفاده خواهیم کرد [7]. در شکل ۳۰-۴ ماژول فرستنده-گیرنده RAK831 را مشاهده می‌کنید.



شکل ۳۰-۴ ماژول فرستنده-گیرنده ۸ کاناله RAK831

¹⁵ Transceiver

ارتباط Raspberry pi و فرستنده-گیرنده ۸ کاناله نیز مانند تک کاناله با پروتکل SPI انجام می‌شود. لذا ابتدا باید SPI را روی Raspberry pi فعال کنیم که در بخش قبل نحوه فعالسازی توضیح داده شد.

سپس Raspberry pi و RAK831 را به یکدیگر طبق شکل ۳۱-۴ متصل می‌کنیم.

RAK831 Pins	Description	Raspberry Pi Pin
1	5V	2
3	GND	6
19	RST (Reset Pin)	17
18	SCK (SPI Clock)	23
17	MISO	21
16	MOSI	19
15	CSN (Chip select)	24

شکل ۳۱-۴ نحوه اتصال پایه‌های RAK831 و Raspberry pi

بعد از این کار باید برنامه فرستنده چند کاناله را روی دستگاه Raspberry pi نصب کنیم تا در هنگام روشن کردن Raspberry pi، این دستگاه به عنوان دروازه LoRaWAN عمل کند. این برنامه در پس زمینه کامپیوتر پس از روشن شدن دستگاه اجرا خواهد شد. این برنامه را می‌توان از مخزن گیت هاب^{۱۶} بر روی Raspberry pi نصب کرد [13]. پس از انجام این مراحل و انجام تغییرات نام دروازه و تنظیمات اتصالات شبکه آن (همانطور که در بخش قبلی توضیح داده شد)، دروازه LoRaWAN آماده به کار خواهد بود. نکته مهم این است که باید قبل از روشن کردن دستگاه و فرستنده-گیرنده، آنتن را به فرستنده-گیرنده متصل کنیم. برای دروازه‌ها از آنتن بزرگ که در شکل ۳۱-۴ نشان دادیم استفاده خواهیم کرد. در این پروژه ما به پیاده‌سازی ۳ دروازه LoRaWAN پرداختیم که در شکل ۳۲-۴ می‌توانید مشاهده کنید.

^{۱۶} Github repository



شکل ۳۲-۴ دروازه‌های LoRaWAN ۸ کاناله پیاده‌سازی شده

پس از اتمام پیاده‌سازی دروازه‌های LoRaWAN باید آن‌ها را در سرور شبکه ثبت کنیم و همچنین تغییراتی را در فایل global_conf.json مربوط به برنامه ای که در آن‌ها اجرا می‌شود اعمال کنیم تا ارتباط دروازه‌ها با سرور شبکه به درستی برقرار شود. ابتدا نحوه ثبت کردن دروازه در سرور شبکه TTN و سپس به تغییراتی که باید در فایل‌های پیکربندی اعمال کنیم می‌پردازیم.

در پلتفرم TTN در بخش Gateways دروازه‌هایی که در سرور شبکه تعریف شده‌اند را نمایش می‌دهد. در این قسمت می‌توان یک دروازه جدید اضافه کرد. در شکل ۳۳-۴ زیر گزینه Add gateways باعث ایجاد یک دروازه جدید می‌شود. پس از وارد کردن اطلاعات لازم مربوط به آن دروازه از جمله Gateway EUI که یک آدرس یکتا برای هر دروازه می‌باشد، این دروازه به لیست دروازه‌ها اضافه می‌شود.

ID	Name	Gateway EUI	Status
b827ebfffe6080af	LoRa-Gateway1	B827EBFFFFE6080AF	Disconnected *
b827ebfffe8c1e06	LoRa-Gateway3	B827EBFFFFE8C1E06	Disconnected *
dca632fffe9cf0dc	LoRa-Gateway2	DCA632FFFE9CFD0C	Disconnected *

شکل ۳۳-۴ دروازه‌های LoRaWAN تعریف شده در سرور شبکه

همانطور که در شکل بالا مشاهده می‌شود، ۳ دروازه پیاده‌سازی شده را در سرور شبکه به روش گفته شده تعریف می‌کنیم. پس از این کار باید پیکربندی دروازه را طوری تغییر دهیم که ارتباط آن با سرور شبکه برقرار شود و اطلاعات را بری آن ارسال کند. برای این کار باید آدرس سرور شبکه را در فایل global_conf.json وارد کنیم. با دستور زیر می‌توان به این فایل دسترسی پیدا کرد:

- sudo nano /opt/ttn-gateway/bin/global_conf.json

با وارد کردن این دستور می‌توان فایل نامبرده را تغییر داد. در شکل ۳۴-۴ قسمتی از فایل که باید آدرس شبکه را در آن تنظیم کنیم نشان داده شده است.

```

{
  "gateway_conf": {
    "gateway_ID": "DCA632EEEE9CFD0C"
  },
  "server_address": "eu1.cloud.thethings.network",
  "serv_port_up": 1700,
  "serv_port_down": 1700,
  "servers": [
    {
      "gateway_ID": "DCA632EEEE9CFD0C"
      "server_address": "eu1.cloud.thethings.network",
      "serv_port_up": 1700,
      "serv_port_down": 1700,
      "serv_enabled": true
    }
  ]
}

```

شکل ۳۴-۴ آدرس سرور شبکه LoRaWAN

همانطور که در شکل قابل مشاهده است، آدرس شبکه تنظیم شده مربوط به پلتفرم TTN (The things network) می‌باشد.

پس از انجام این کار، دروازه روی پورت^{۱۷} شماره ۱۷۰۰ اطلاعات را با سرور شبکه رد و بدل می‌کند و همچنین در بخش دروازه‌ها در سرور شبکه وضعیت دروازه به حالت connected تغییر می‌کند. در شکل ۴-۴ ۳۵ سه دروازه تعریف شده در سرور شبکه در وضعیت متصل هستند.

The screenshot shows the 'Gateways' tab of the The Things Stack interface. It lists three gateways:

ID	Name	Gateway EUI	Status
b827ebffffe6080af	LoRa-Gateway1	B827EBFFFFE6080AF	Connected *
b827ebffffe8c1e06	LoRa-Gateway3	B827EBFFFFE8C1E06	Connected *
dca632ffffe9cf0c	LoRa-Gateway2	DCA632FFFFE9CFD0C	Connected *

A red box highlights the 'Connected' status for all three gateways. The interface also includes a search bar, a 'Claim gateway' button, and a '+ Add gateway' button. The top navigation bar shows tabs for Overview, Applications, Gateways, and Organizations. The right side of the interface shows user information for 'Amirreza Ghafoori'.

شکل ۴-۴ وضعیت اتصال دروازه‌ها در سرور شبکه TTN

پس از راهاندازی دروازه‌ها، زیر ساخت فیزیکی شبکه LoRaWAN کامل می‌شود و حال تنها باید اطلاعات لازم را در سرور کاربرد تعریف کنیم.

¹⁷ Port

۴-۳ راهاندازی سرور شبکه و سرور کاربرد

یک عضو مهم و اصلی دیگر در شبکه LoRaWAN سرور شبکه می‌باشد که نقش اساسی در شبکه اینها می‌کند. دروازه‌ها با اتصال به سرور شبکه داده‌های دریافت شده‌شان را برای سرور می‌فرستند و سرور شبکه آنها را دریافت و بسته‌های تکراری را دور می‌اندازد. ویژگی‌هایی که یک سرور شبکه باید دارا باشد را می‌توان به این صورت بیان کرد:

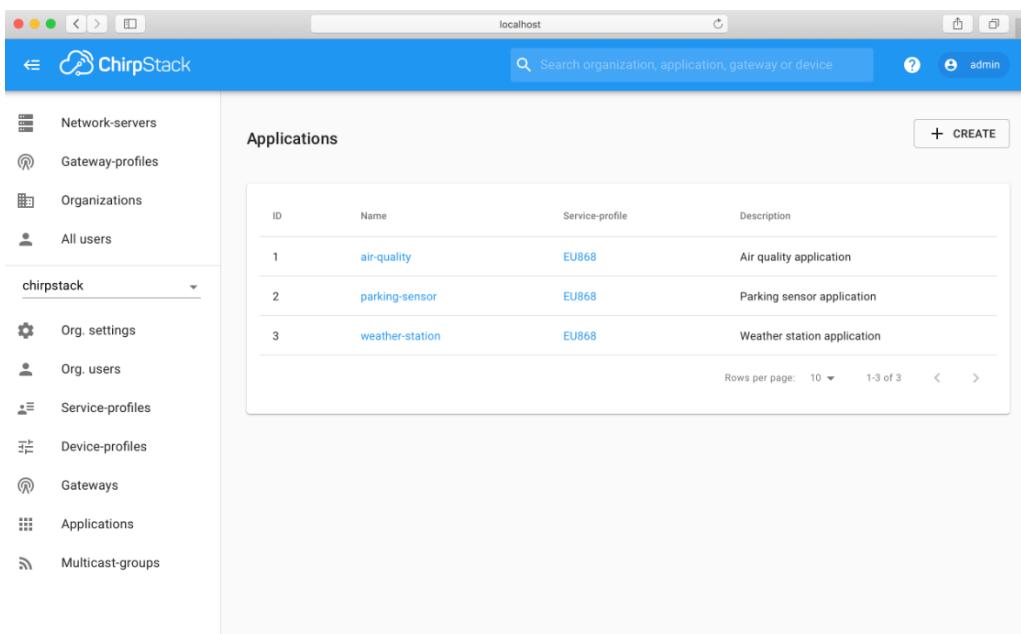
- پشتیبانی از کلاس A، B و C دستگاه‌های انتهایی
- پشتیبانی از الگوریتم ADR
- نشان دادن داده‌های دریافت شده در سرور به صورت زنده
- امکان پیکربندی پارامترهای مختلف در آن مانند پارامترهای مربوط به کانال مورد استفاده
- سازگاری با لایه MAC فناوری LoRaWAN
- امکان استفاده از API¹⁸ ها و امکان ادغام¹⁹ آن با سرورها و کاربردهای دیگر

علاوه بر موارد ذکر شده سرور می‌تواند توانایی‌های دیگری هم مانند تحلیل داده‌های دریافتی و یا امکان ذخیره داده‌ها را داشته باشد، اما ضروری است که امکانات ذکر شده در آن پیاده‌سازی شده باشد.

سرورهای شبکه مختلفی برای LoRaWAN وجود دارد و همچنین می‌توان از منابع متن-باز مانند سرور شبکه ChirpStack استفاده کرد. این منبع امکان پیاده‌سازی یک سرور شبکه به دلخواه و با امکاناتی که لازم داریم و روی سرور خودمان را در اختیار ما قرار می‌دهد و مهم‌تر از آن اینکه ویژگی‌های ضروری یک سرور شبکه که در بالا ذکر شد را دارد. در شکل ۴-۳۶ فضای این پلتفرم قابل مشاهده است.

¹⁸ Application programming interface

¹⁹ Integration



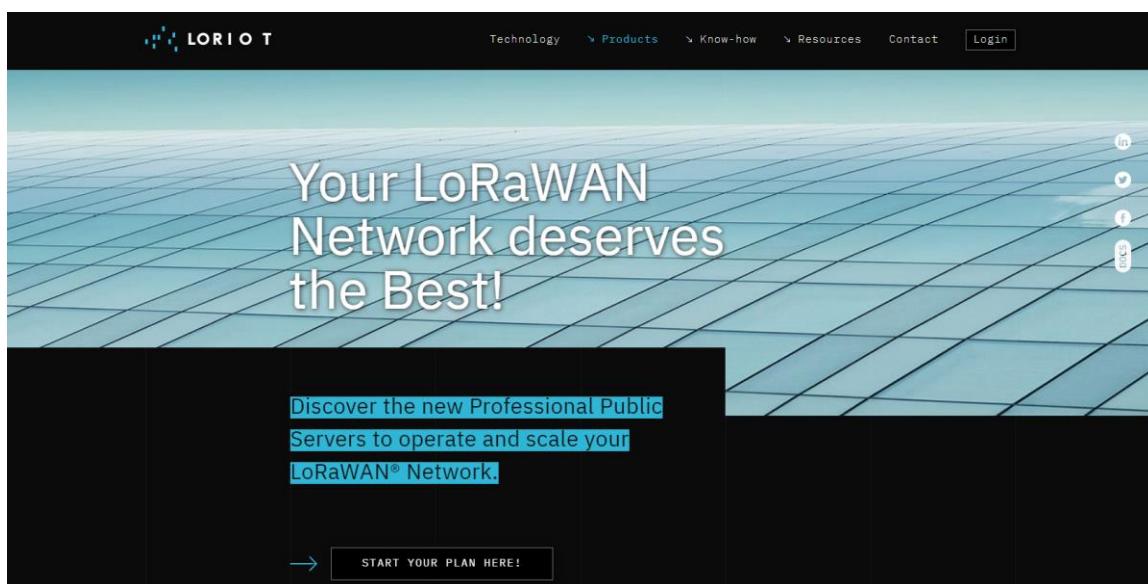
شکل ۳۶-۴ سرور شبکه متن-باز ChirpStack

می‌توان برای سهولت کار و عدم نیاز به پیکربندی سرور خودمان، از نمونه‌های سرور شبکه موجود در بازار TTN (The things Network) استفاده کنیم. دو نمونه از معروف ترین سرورهای شبکه موجود سرور شبکه (The things Network) [thethingsnetwork.com] و سرور شبکه loriot [loriot.io] می‌باشد که در شکل‌های ۳۷-۴ و ۳۸ نمای این دو پلتفرم قابل مشاهده است.

The screenshot shows the The Things Stack Community Edition interface. At the top, there are navigation tabs: THE THINGS NETWORK, THE THINGS STACK Community Edition (selected), Overview, Applications, Gateways, and Organizations. There is also a note about EU1 Community Fair use policy applies. On the right, a user profile for Amirreza Ghafoori is shown.

The main area features a welcome message: "Welcome back, Amirreza Ghafoori! 🎉". Below it, there is a brief introduction: "Walk right through to your applications and/or gateways. Need help? Have a look at our Documentation or Get support." Two large callout boxes are present: one for "Go to applications" (showing a smartphone icon) and one for "Go to gateways" (showing a gateway device icon).

شکل ۳۷-۴ پلتفرم TTN



شکل ۴-۳۸ پلتفرم LORIOT

انتخاب ما پلتفرم TTN می‌باشد زیرا هدف ما پژوهشی است و نیازی به خرید سرویس‌های خاص نداریم. پلتفرم TTN نسخه Community دارد و می‌توان به صورت رایگان برای تعداد محدودی دستگاه انتهایی و دروازه از آن استفاده کرد. پس از ثبت نام در پلتفرم می‌توان در بخش Console جزئیات شکل ۳۷-۴ را مشاهده کرد و در بخش Gateways همانطور که در قسمت پیاده‌سازی دروازه توضیح داده شد، می‌توانیم دروازه‌های ساخته شده را در سرور شبکه معرفی کنیم و ارتباط آن‌ها را برقرار سازیم.

برای پیاده‌سازی سرور کاربرد به بخش Applications می‌رویم و با تعریف یک کاربرد جدید می‌توانیم به تعداد دلخواه دستگاه‌نهایی به آن کاربرد اضافه کنیم. در این بخش با زدن Add application می‌توانیم کاربرد جدید دلخواه را اضافه کنیم. در شکل ۳۹-۴ فضای کاربرد قابل مشاهده است.

شکل ۴-۳۹ اضافه کردن یک کاربرد جدید به سرور کاربرد در پلتفرم TTN

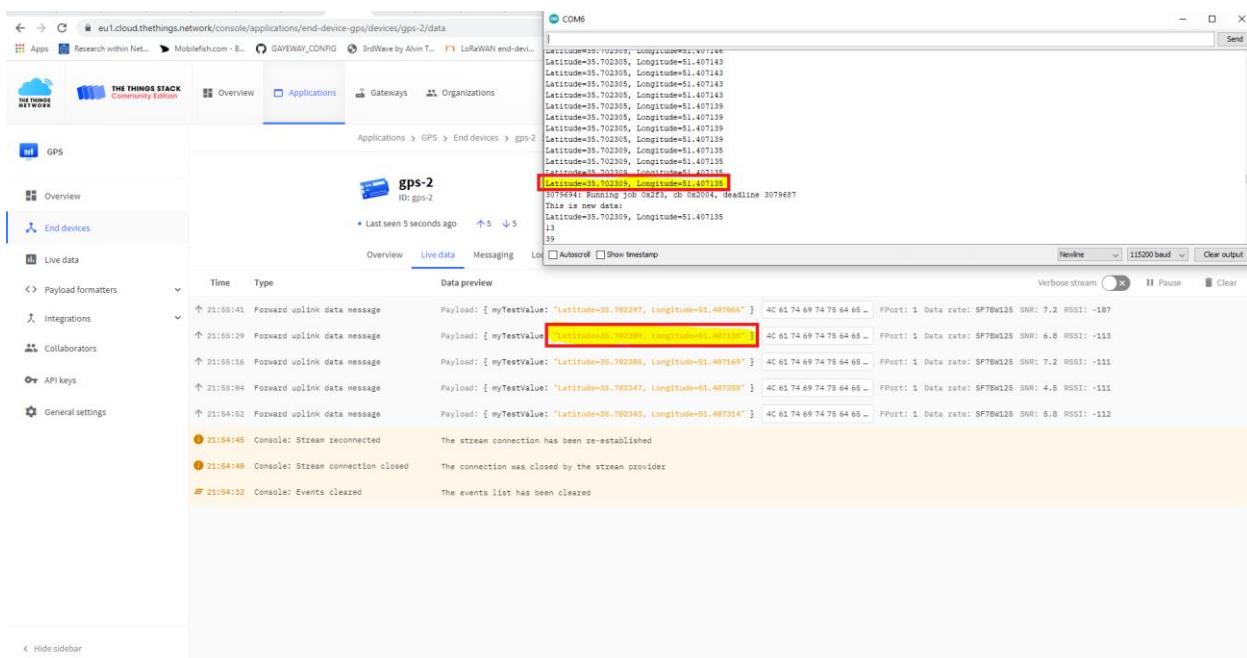
همانطور که در شکل بالا مشاهده می‌شود، کاربردهایی از قبل در این سرور تعریف کردہ‌ایم. سپس به کاربرد مورد نظر رفته و دستگاه‌های انتهایی را اضافه می‌کنیم. برای اضافه کردن دستگاه انتهایی Add end-device را می‌زنیم. برای دیدن داده‌های دریافتی به صورت زنده از منو سمت چپ به قسمت Live data می‌رویم و برای ادغام کردن سرور کاربرد با کاربردهای دیگر یا وب سرویس‌های دیگر از بخش Integrations اقدام می‌کنیم. موارد ذکر شده را در شکل ۴۰-۴ مشاهده می‌کنید.

شکل ۴۰-۴ سرور کاربرد در پلتفرم TTN

همانطور که مورد انتظار است داده‌های دریافت شده در پلتفرم TTN در بخش سرور شبکه که در قسمت Gateways قابل مشاهده است، به صورت رمز شده می‌باشند و محتوای پیام‌ها قابل روئیت نمی‌باشد. اما در سرور کاربرد با توجه به اینکه رمزگذاری لایه دوم باز می‌شود می‌توان محتوای پیام‌های دستگاه‌های انتهایی را مشاهده کرد. برای اضافه کردن یک دستگاه انتهایی جدید گزینه‌های متعددی وجود دارد که می‌توان از امکانات از پیش تعیین شده در خود پلتفرم و یا به صورت دستی اقدام کرد. اطلاعاتی از قبیل کلید جلسه شبکه و کلید جلسه کاربرد و آدرس دستگاه در قسمت سرور کاربرد ساخته و استخراج می‌شود. در شکل ۱۸-۴ این موارد نمایش داده شد. از آنجایی که ما ۵ دستگاه انتهایی طراحی و پیاده‌سازی کردیم، در سرور کاربرد این ۵ دستگاه را تعریف کردیم که با نام‌های gps-1 تا gps-5 نامگذاری شده‌اند. در شکل ۴۰-۴ دستگاه‌های انتهایی تعریف شده قابل مشاهده می‌باشند.

۴-۴ بررسی عملکرد انتهای-به-انتهایی شبکه پیاده شده

پس از اتمام کار ما با سرور کاربرد، شبکه LoRaWAN کامل شده و آماده استفاده می‌باشد. برای آزمایش و بررسی انتقال داده از دستگاه‌انتهایی تا سرور کاربرد، به عنوان نمونه کاربرد GPS را روی یکی از دستگاه‌ها انتهایی پیاده‌سازی کردیم و آن را بررسی می‌کنیم. در شکل ۴-۱۷ این دستگاه انتهایی نشان داده شد. شکل ۴-۱۷ ارسال درست اطلاعات به دست آمده از مژول GPS در دستگاه انتهایی به سمت سرور کاربرد را نمایش می‌دهد.



شکل ۴-۱۷ ارسال اطلاعات جمع‌آوری شده در دستگاه انتهایی به سرور کاربرد

همانطور که در شکل قابل مشاهده است، مشخصات طول و عرض جغرافیایی به دست آمده از مژول GPS در دستگاه انتهایی که در نمایشگر سریال آن در سمت راست بالای تصویر نشان داده شده است، به درستی به سرور کاربرد رسیده و دریافت شده است. در نتیجه ارتباط دستگاه انتهایی تا سرور کاربرد به درستی برقرار شده است و شبکه ما آماده آزمایش و ارزیابی می‌باشد. برای ارزیابی شبکه ما کاربرد خاصی را پیاده نمی‌کنیم چرا که هدف ارزیابی مشخصات خود شبکه LoRaWAN می‌باشد و محتواهای پیام‌های ارسال شده برای ما اهمیتی ندارد. راجع به جزئیات ارزیابی در فصل بعد توضیح داده خواهد شد.

جمع بندی

در این فصل به جزئیات پیاده‌سازی شبکه LoRaWAN پرداختیم. در ابتدا نحوه طراحی و ساخت دستگاه انتهایی را توضیح دادیم، سپس به پیاده‌سازی دروازه‌های شبکه پرداختیم. در ادامه با سرور شبکه و سرور کاربرد مورد استفاده آشنا شدیم و نحوه ثبت دروازه‌های در سرور شبکه و دستگاه‌های انتهایی در سرور کاربرد را شناختیم. در این پروژه ما ۵ دستگاه انتهایی و ۳ درواز طراحی و پیاده‌سازی کردیم و همچنین از پلتفرم TTN به عنوان بستری برای سرور شبکه و سرور کاربرد استفاده کردیم. در شکل ۴۲-۴ کل زیرساخت فیزیکی ساخته شده برای شبکه LoRaWAN را که در این پروژه انجام شده است، مشاهده می‌کنید.



شکل ۴۲-۴ زیرساخت پیاده‌سازی شده برای شبکه LoRaWAN

در قسمت پایین دستگاه‌های انتهایی را مشاهده می‌کنید که در ۳ دستگاه سمت راست مازول منبع تغذیه به آن‌ها متصل شده و در ۲ دستگاه سمت چپ به صورت جدا هستند. در بالای تصویر نیز ۳ دروازه پیاده‌سازی شده و آنتن‌هایی که برای آن‌ها استفاده خواهد شد قابل روئیت می‌باشد. برای ارزیابی شبکه LoRaWAN

از این بستر استفاده خواهیم کرد. در فصل بعد به تعریف سناریوهای ارزیابی و نتایج ارزیابی به دست آمده خواهیم پرداخت.

فصل پنجم

ارزیابی شبکه LoRaWAN

ارزیابی شبکه LoRaWAN

در فصل چهارم با نحوه پیاده‌سازی اجزاء شبکه LoRaWAN آشنا شدیم و یک زیرساخت کامل برای این فناوری طراحی و پیاده‌سازی کردیم. در ادامه قصد داریم با استفاده از زیرساخت محیا شده برای شبکه LoRaWAN به ارزیابی این شبکه در سناریوهای ثابت^۱ و متحرک^۲ از نظر نرخ بسته‌های دریافتی، قدرت سیگنال و نسبت سیگنال به نویز در فواصل می‌ختلف از دروازه و انرژی مصرفی دستگاه‌ها در فضای بیرون^۳ بپردازیم. برای این کار در ابتدا پارامترهای دستگاه‌های انتهایی را شامل فاصله بین ارسال داده توسط دستگاه، پهنای باند، عامل گسترش، توان ارسال^۴ و محتوای داده‌ای که دستگاه‌ها ارسال می‌کنند، تنظیم می‌کنیم. سپس از کارکرد دست دروازه‌ها اطمینان حاصل می‌کنیم و پس از آن به تعریف سناریوهای ارزیابی می‌پردازیم. در نهایت ارزیابی‌ها را در سناریوهای تعریف شده انجام داده و نتایج را گزارش خواهیم کرد.

۱-۵ تنظیم پارامترهای دستگاه‌های انتهایی

در این پروژه برای ارزیابی‌ها ما از ۳ دستگاه انتهایی استفاده خواهیم کرد. شناسه این دستگاه‌ها به نام gps-1، gps-3 و gps-5 در سرور کاربرد قابل شناسایی می‌باشد. همچنین محتوای داده آن‌ها را طوری تنظیم می‌کنیم که دستگاه‌های انتهایی شناسه خودش را به عنوان داده برای سرور کاربرد ارسال کند. برای تغییر محتوای باید بخش [mydata] را در کد دستگاه تغییر دهیم. همچنین فاصله ارسال بسته‌های را برای دستگاه انتهایی به مدت زمان ۱۰ ثانیه تنظیم می‌کنیم. ارسال بسته در هر ۱۰ ثانیه در فرکانس‌های بدون مجوز ISM^۵ در استفاده‌های مداوم و صنعتی از شبکه LoRaWAN درست نمی‌باشد چرا که باید از مقررات چرخه وظیفه^۶ پیروی کرد که این مقررات برای ارسال بسته توسط دستگاه انتهایی ۱ درصد از زمان شبانه

¹ Stationary

² Mobile

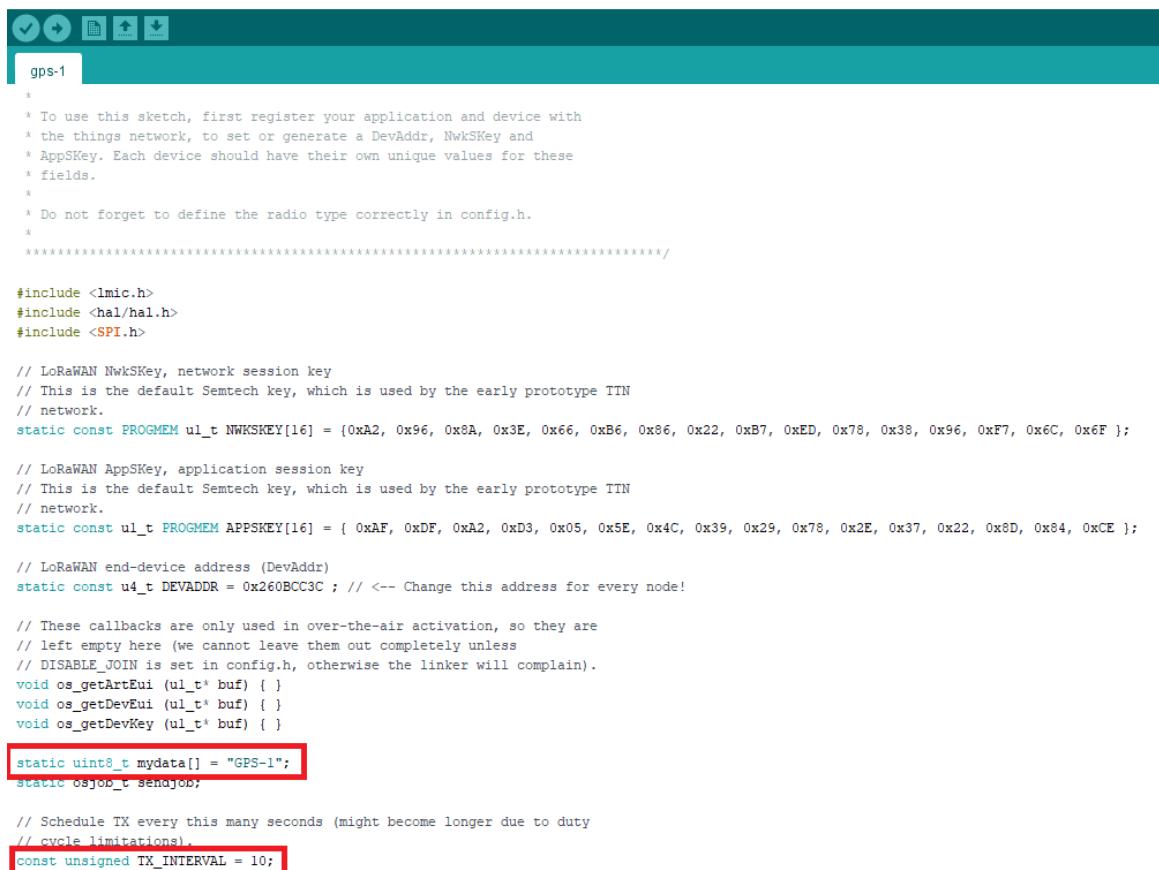
³ Outdoor

⁴ Transmit power

⁵ Industrial, Scientific, and Medical

⁶ Duty cycle

روز را مجاز می‌دانند. اما در این پروژه به منظور ارزیابی پژوهشی و به مدت کوتاه ۱ روزه ما این محدودیت را نادیده می‌گیریم و هر ۱۰ ثانیه از دستگاه انتهايی داده ارسال خواهیم کرد. برای تنظیم این عدد باید مقدار TX_INTERVAL را در کد دستگاه تغییر دهیم. به عنوان مثال در شکل ۱-۵ محتوای داده- ۱ و زمان ارسال بسته‌های و محل تنظیم آن‌ها در کد دستگاه را مشاهده می‌کنید.



```

gps-1

/*
 * To use this sketch, first register your application and device with
 * the things network, to set or generate a DevAddr, NwkSKey and
 * AppSKey. Each device should have their own unique values for these
 * fields.
 *
 * Do not forget to define the radio type correctly in config.h.
 */

#include <lmic.h>
#include <hal/hal.h>
#include <SPI.h>

// LoRaWAN NwkSKey, network session key
// This is the default Semtech key, which is used by the early prototype TTN
// network.
static const PROGMEM ul_t NWKSKEY[16] = {0xA2, 0x96, 0x8A, 0x3E, 0x66, 0xB6, 0x86, 0x22, 0xB7, 0xED, 0x78, 0x38, 0x96, 0xF7, 0x6C, 0x6F};

// LoRaWAN AppSKey, application session key
// This is the default Semtech key, which is used by the early prototype TTN
// network.
static const ul_t PROGMEM APPSKEY[16] = {0xAF, 0xDE, 0xA2, 0xD3, 0x05, 0x5E, 0x4C, 0x39, 0x29, 0x78, 0xE2, 0x37, 0x22, 0x8D, 0x84, 0xCE};

// LoRaWAN end-device address (DevAddr)
static const u4_t DEVADDR = 0x260BCC3C; // <-- Change this address for every node!

// These callbacks are only used in over-the-air activation, so they are
// left empty here (we cannot leave them out completely unless
// DISABLE_JOIN is set in config.h, otherwise the linker will complain).
void os_getArtEui (ul_t* buf) {}
void os_getDevEui (ul_t* buf) {}
void os_getDevKey (ul_t* buf) {}

static uint8_t mydata[] = "GPS-1";
static osjob_t sendjob;

// Schedule TX every this many seconds (might become longer due to duty
// cycle limitations).
const unsigned TX_INTERVAL = 10;

```

شکل ۱-۵ تنظیم محتوای ارسالی و زمان بین ارسال بسته‌ها در دستگاه انتهايی

سپس به تنظیم پهنه‌ای باند، عامل گسترش و توان ارسالی دستگاه انتهايی می‌پردازیم. نکته قابل توجه در این قسمت این است که نمی‌توان در دستگاه انتهايی عامل گسترش را به صورت کد سخت^۱ روی مقادیر ۱۱ و ۱۲ تنظیم کرد. این جزوی از قوانین LoRa Alliance می‌باشد. در صورت انجام این کار، سرور شبکه

¹ Hardcoded

بسته‌ها را دریافت نمی‌کند و اجازه ارتباط و ارسال داده از دستگاه انتهایی به سرور کاربرد را نمی‌دهد. در حقیقت با تنظیم عامل گسترش ۱۲ به صورت کد سخت روی دستگاه انتهایی، دستگاه انتهایی داده‌های خود را با این عامل گسترش ارسال می‌کند اما در سرور شبکه و سرور کاربرد هیچ داده‌ای مشاهده نمی‌شود. در نتیجه بالاترین عامل گسترشی که می‌توان برای ارسال داده صحیح تعریف کرد ۱۰ می‌باشد. همچنین در این پژوهش نرخ ارسال داده برای ما اهمیتی ندارد لذا برای بالا بردن برد دستگاه‌های انتهایی از کمترین پهنای باند یعنی ۱۲۵ کیلوهرتز استفاده می‌کنیم. همچنین از آنجایی که برد بالا برای ما اهمیت دارد توان ارسالی را روی ماسکیمم یعنی ۱۴ دسیبل تنظیم می‌کنیم. همانطور که انتظار می‌رود با بالا بردن توان ارسالی، انرژی مصرفی دستگاه‌های انتهایی نیز افزایش می‌یابد. برای تنظیم پارامترهای گفته شده باید قسمت gps-1 در کد دستگاه انتهایی تغییر دهیم. در شکل ۲-۵ این قسمت برای دستگاه LMIC_setDrTxpow را در کد دستگاه انتهایی تغییر دهیم.

در شکل ۲-۵ این قسمت برای دستگاه LMIC_setDrTxpow را در کد دستگاه انتهایی تغییر دهیم. در شکل ۲-۵ این قسمت برای دستگاه gps-1 نشان داده شده است.

```

gps-1
// TTN defines an additional channel at 869.525Mhz using SF9 for class B
// devices' ping slots. LMIC does not have an easy way to define set this
// frequency and support for class B is spotty and untested, so this
// frequency is not configured here.
#ifndef CFG_us915
// NA-US channels 0-71 are configured automatically
// but only one group of 8 should (a subband) should be active
// TTN recommends the second sub band, 1 in a zero based count.
// https://github.com/TheThingsNetwork/gateway-conf/blob/master/US-global\_conf.json
LMIC_selectSubBand(1);
#endif

// Disable link check validation
LMIC_setLinkCheckMode(0);

// TTN uses SF9 for its RX window.
LMIC.dn2Dr = DR_SF9;

// Set data rate and transmission power for uplink (note: txpow seems to be ignored by the library)
LMIC_setDrTxpow(DR_SF7, 14);

// Start job
do_send(&sendjob);
}

void loop() {
    // پهنای باند
    os_runloop_once();
}

```

شکل ۲-۵ تنظیم توان ارسالی و عامل گسترش و پهنای باند

پهنانی باند به صورت صریح مشخص نمی‌شود و جزئی در حقیقت ترکیب پهنانی باند و عامل گسترش‌های مختلف را با DR های مختلف نمایش می‌دهند. در شکل ۳-۵ چند نمونه از این ترکیب‌ها نمایش داده شده است [18].

Data Rate (DR)	Configuration			Physical Bit Rate (bit/s)
	Modulation	Spreading Factor (SF)	Bandwidth	
0	LoRa	SF12	125 kHz	250
1	LoRa	SF11	125 kHz	440
2	LoRa	SF10	125 kHz	980
3	LoRa	SF9	125 kHz	1760
4	LoRa	SF8	125 kHz	3125
5	LoRa	SF7	125 kHz	5470
6	LoRa	SF7	250 kHz	11,000
7	FSK	50 kbit/s		50,000
8-15	Reserved for Future Use			

شکل ۳-۵ نرخ داده‌های مختلف با استفاده از ترکیب پهنانی باند و عامل گسترش‌های مختلف [18]

پس از تنظیم پارامترهای ذکر شده، دستگاه‌های انتهایی آماده به کار هستند. برای این پروژه پارامترهای ۳ دستگاه انتهایی مورد استفاده را مطابق جدول ۱-۵ تنظیم کردیم. همچنین پارامترهای تنظیم شده در ۲ دستگاه انتهایی دیگر در اینجا ذکر شده است.

جدول ۱-۵ پارامترهای تنظیم شده در دستگاه‌های انتهایی

شناسه دستگاه	عامل گسترش	پهنهای باند	توان ارسالی	محتوى داده	زمان بین ارسال بسته‌ها
gps-1	۷	۱۲۵ کیلوهرتز	۱۴ دسیبل	GPS-1	۱۰ ثانیه
gps-2	۷	۱۲۵ کیلوهرتز	۷ دسیبل	GPS-2	۵ ثانیه
gps-3	۱۰	۱۲۵ کیلوهرتز	۱۴ دسیبل	GPS-3	۱۰ ثانیه
gps-4	۱۲	۵۰۰ کیلوهرتز	۱۴ دسیبل	GPS-4	۵ ثانیه
gps-5	۱۰	۱۲۵ کیلوهرتز	۱۴ دسیبل	GPS-5	۱۰ ثانیه

در شکل ۴-۵ دستگاه‌های انتهایی که در این ارزیابی مورد استفاده قرار گرفتند را مشاهده می‌کنید. شناسه هر دستگاه و عامل گسترش و پهنهای باند آن با برچسب بر روی آنتن آن مشخص شده‌است. همچنین از دستگاه انتهایی gps-2 و gps-4 برای ارزیابی مصرف انرژی شبکه استفاده کردیم. همانطور که گفته شد در کتابخانه LMIC ارسال داده با عامل گسترش ۱۲ به درستی انجام نمی‌شود، اما می‌توان برای بررسی انرژی مصرفی دستگاه از این عامل گسترش روی دستگاه انتهایی استفاده کرد. در نتیجه برای ارزیابی انرژی مصرفی شبکه عامل گسترش این دو دستگاه را مینیمم و ماکزیمم ممکن در کتابخانه LMIC یعنی ۷ و ۱۲ تعریف کرده و همچنین توان ارسالی آن‌ها را به ترتیب ۷ و ۱۴ قرار می‌دهیم. از طرفی بازه زمانی بین ارسال هر دو بسته را در این دو دستگاه ۵ ثانیه قرار می‌دهیم تا زودتر بتوانیم با خاموش شدن این دو دستگاه در مورد انرژی مصرفی آن‌ها نتیجه‌گیری کنیم. برای کاهش مزاحمت سیگنال‌های ارسالی روی باند فرکانسی بدون مجوزی که استفاده می‌کنیم دستگاه‌ها را در یک محفظه پوشیده شده با فویل آلمینیومی قرار می‌دهیم.



شکل ۴-۵ دستگاه‌های انتهایی مورد استفاده در ارزیابی شبکه در بیرون

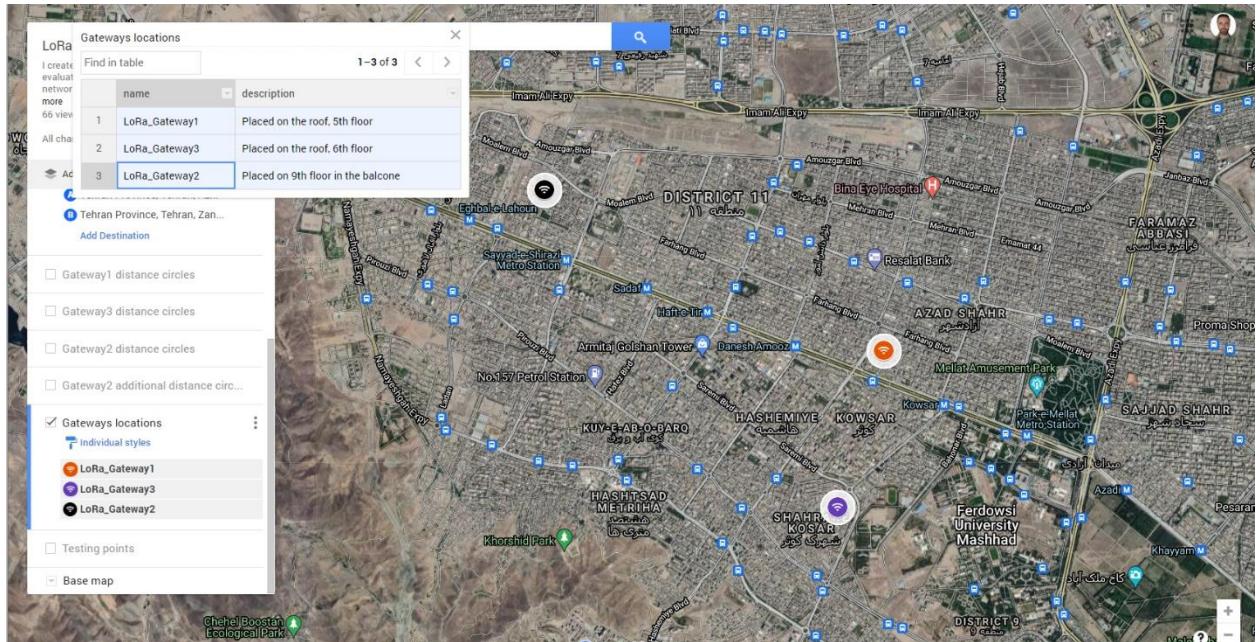
۲-۵ تعریف سناریوهای ارزیابی

در این بخش به تعریف سناریوهای ارزیابی و نمایش آن‌ها روی نقشه ساخته شده برای این پروژه می‌پردازیم. برای اینکه بتوانیم ارزیابی‌ها را به طور دقیق انجام دهیم و از مکان دقیق دستگاه‌های انتهایی، مکان دروازه‌ها و نقاطی که در آن‌ها تست گرفته شده اطلاع داشته باشیم، با استفاده از نقشه Google Map یک نقشه با مشخصاتی که می‌خواهیم طراحی می‌کنیم. این نقشه به صورت برخط^۱ از طریق پیوند^۲ ذکر شده در پاورقی قابل دیدن می‌باشد. در ادامه به بررسی جزئیات این نقشه می‌پردازیم.

در شکل ۵-۵ منطقه‌ای از شهر مشهد که می‌خواهیم ارزیابی‌ها را در آن انجام بدیم نمایش داده شده است. در این شکل نقاط مشخص شده با رنگ‌های مشکی، بنفش و نارنجی نقاطی هستند که دروازه‌ها را در آن‌ها مستقر کردیم.

¹ Online

² My google map link: <https://goo.gl/maps/o4tEhuaAsYYVAEwn9>



شکل ۵-۵ منطقه ارزیابی در مشهد، همراه با مکان دروازه‌ها

نقطه مشکی محل قرارگیری ۲ LoRa_Gateway2، نقطه بنفس محل قرارگیری ۳ LoRa_Gateway3 و نقطه نارنجی محل قرارگیری ۱ LoRa_Gateway1 می‌باشد. در سمت چپ شکل نام و رنگ دروازه‌ها قابل مشاهده می‌باشد. برای مستقر کردن دروازه‌ها در موقعیت‌های مشخص شده در شکل ۵-۵، از یک پایه برای نگهداری از آنتن دروازه‌ها استفاده کردیم. همچنین ارتباط دروازه با اینترنت و سرور شبکه از طریق یک کابل Ethernet برقرار شده بود. برای برقراری ارتباط اینترنت دروازه‌ها، در دروازه ۲ LoRa_Gateway2 از مودم^۱ ثابت در منزل و برای ۱ LoRa_Gateway1 و ۳ LoRa_Gateway3 از مودم سیار ایرانسل استفاده کردیم. در ادامه تصاویر محل قرارگیری دروازه‌ها را مشاهده خواهیم کرد.

دروازه ۲ LoRa_Gateway2 در تراس طبقه نهم در قسمت جنوبی ساختمان قرار گرفته که در شکل ۶-۵ می‌توان مشاهده کرد. همانطور که گفته شد موقعیت این دروازه با نقطه مشکی رنگ در نقشه شکل ۵-۵ قابل مشاهده است.

^۱ Modem

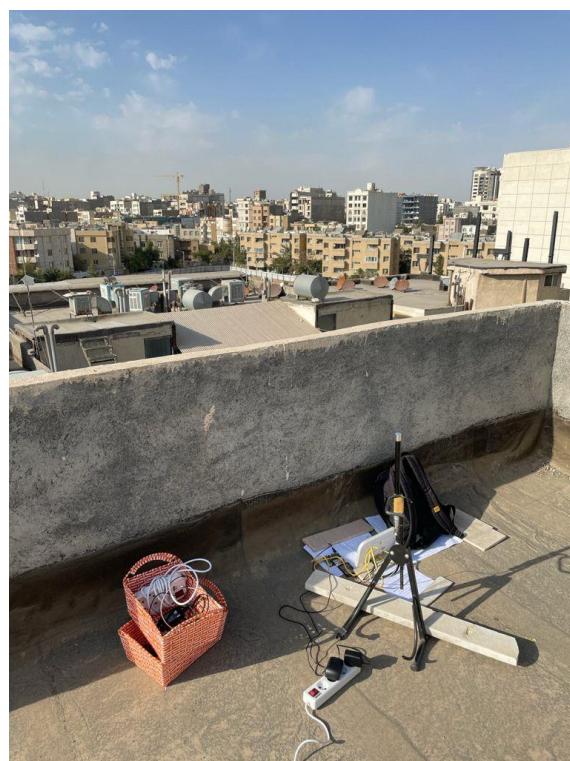


شکل ۵-۶ محل قرارگیری و نمای ۲ LoRa_Gateway

دروازه LoRa_Gateway3 که موقعیت آن با رنگ بنفش در شکل ۵-۵ مشخص شده است، بر روی پشت بام طبقه یک ساختمان ۵ طبقه (طبقه ششم) در قسمت شمال غربی ساختمان قرار گرفت که در شکل ۷-۵ می‌توان تجهیزات استفاده شده و در شکل ۸-۵ نمای این دروازه را مشاهده کرد.



شکل ۵-۵ تجهیزات شبکه و آنتن دروازه LoRa_Gateway3



شکل ۵-۶ محل قرارگیری و نمای دروازه LoRa_Gateway3

در انتهای دروازه LoRa_Gateway1 که در موقعیت آن در نقشه با رنگ نارنجی نشان داده شده است، در پشت بام یک ساختما ۴ طبقه (طبقه پنجم) در قسمت جنوبی ساختمان قرار گرفت که در شکل ۹-۵ تجهیزات مورد استفاده و در شکل ۱۰-۵ نمای دروازه قابل مشاهده می‌باشد.

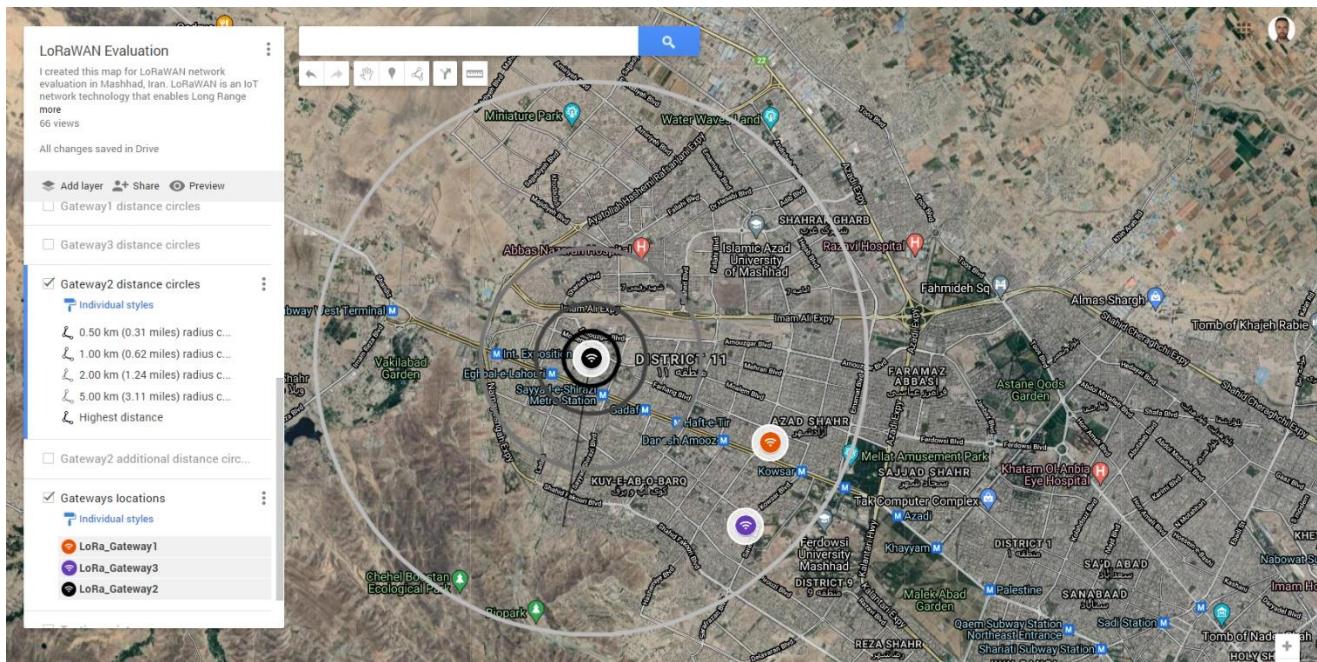


شکل ۹-۵ تجهیزات شبکه و آنتن دروازه LoRa_Gateway1



شکل ۱۰-۵ محل قرارگیری و نمای دروازه LoRa_Gateway1

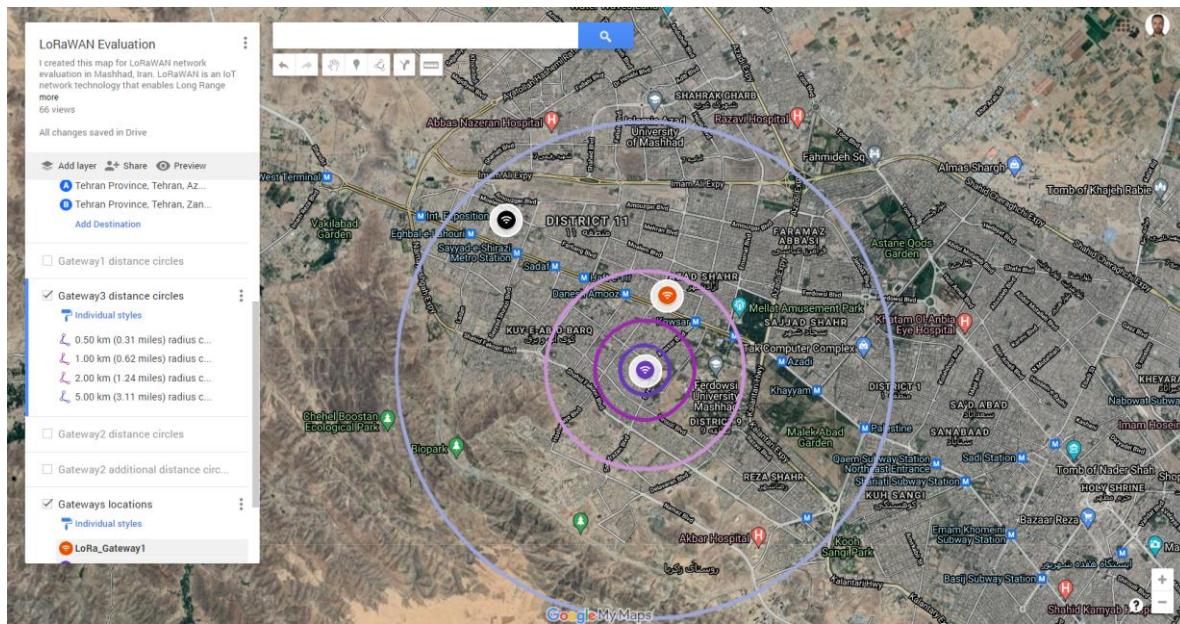
پس از استقرار دروازه‌ها در محل‌های تعیین شده، دایره‌های مشخص کننده فاصله برای مشخص کردن محدوده‌ها و فواصل از دروازه‌ها بر روی نقشه رسم می‌کنیم. در شکل ۱۱-۵ دایره‌های فاصله از دروازه LoRa_Gateway2 با شعاع‌های ۵۰۰ متر، ۱ کیلومتر، ۲ کیلومتر و ۵ کیلومتر را مشاهده می‌کنید. طبق آمار شرکت Semtech صاحب فناوری LoRa، برد این شبکه در محیط شهری می‌تواند تا ۵ کیلومتر باشد [14].



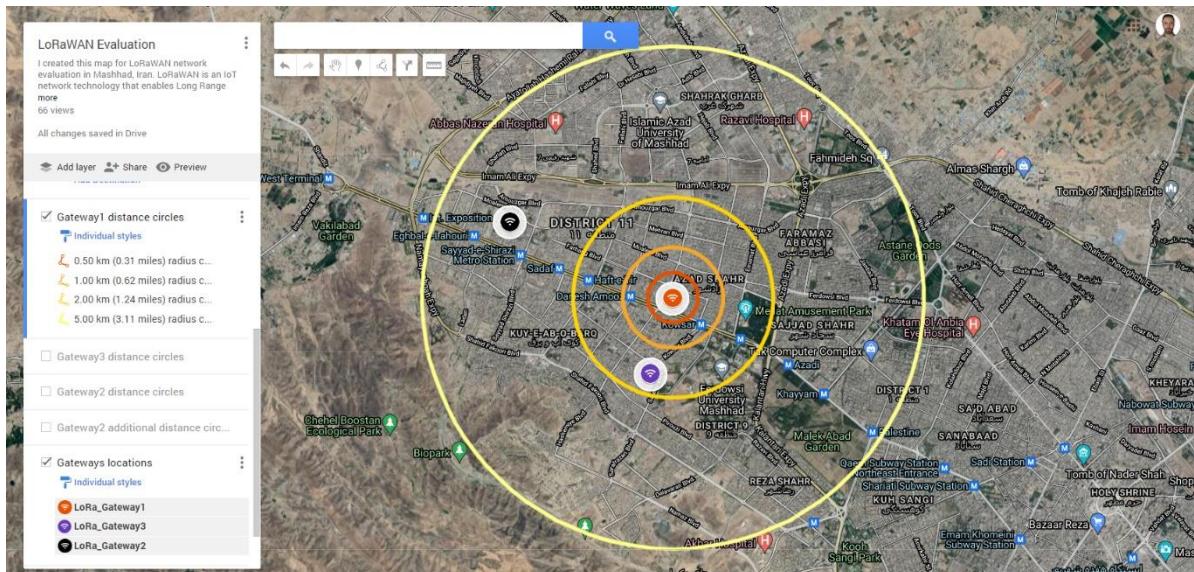
شکل ۱۱-۵ دایره‌های فاصله دروازه ۲

همانطور که در شکل مشخص شده است با افزایش فاصله رنگ دایره را کمزنگ کردیم. شعاع هر دایره در سمت چپ شکل قابل مشاهده می‌باشد.

به همین ترتیب برای دروازه‌های شماره ۱ و ۳ نیز دایره‌های فاصله را رسم می‌کنیم. در شکل ۱۲-۵ فواصل دروازه ۳ LoRa_Gateway3 و در شکل ۱۳-۵ فواصل دروازه ۱ LoRa_Gateway1 نشان داده شده است.

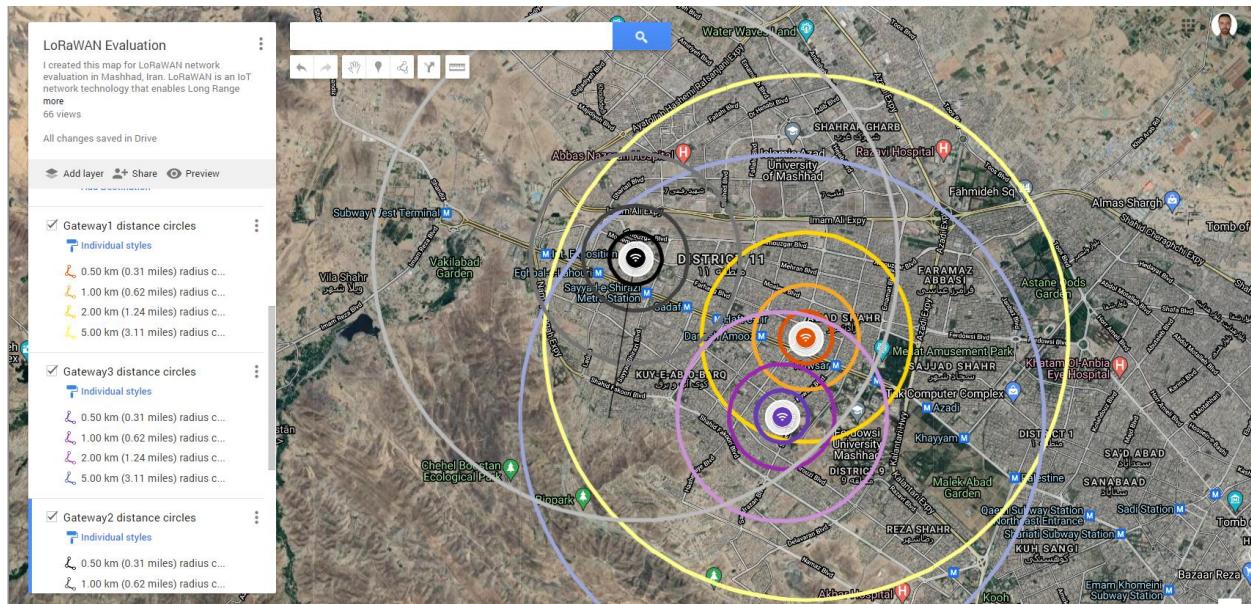


شکل ۱۲-۵ دایره‌های فاصله از دروازه LoRa_Gateway3



شکل ۱۳-۵ دایره‌های فاصله از دروازه LoRa_Gateway1

حال برای نشان دادن نقاط همپوشانی و مشترک دروازه‌ها به صورت همزمان دایره‌های فاصله آن‌ها را در شکل ۱۴-۵ نشان داده‌ایم.



شکل ۱۴-۵ دایره‌های فاصله از ۳ دروازه

همانطور که در شکل بالا مشاهده می‌شود، در صورت استفاده از آنتن‌های بزرگ و مناسب و قرار دادن دروازه‌ها در پشت‌بوم ساختمان‌های مرتفع بر روی دکل، می‌توان با ۳ دروازه منطقه بسیار وسیعی از شهر را تحت پوشش شبکه LoRaWAN قرار داد. با توجه به نبود این امکانات در انجام این پروژه احتمال دادیم که برد دروازه‌های سیگنال دستگاه‌های در فاصله بیشتر از ۱.۵ کیلومتر را دریافت نکنند، اما در ارزیابی که به فواصل بیشتری نیز رسیدیم که در ادامه به آن خواهیم پرداخت. در ادامه جهت شلوغ نشدن نقشه در هر بخش فقط در صورت لزوم دایره‌های فاصله را نشان خواهیم داد.

۱-۲-۵ تعریف سناریوهای ثابت

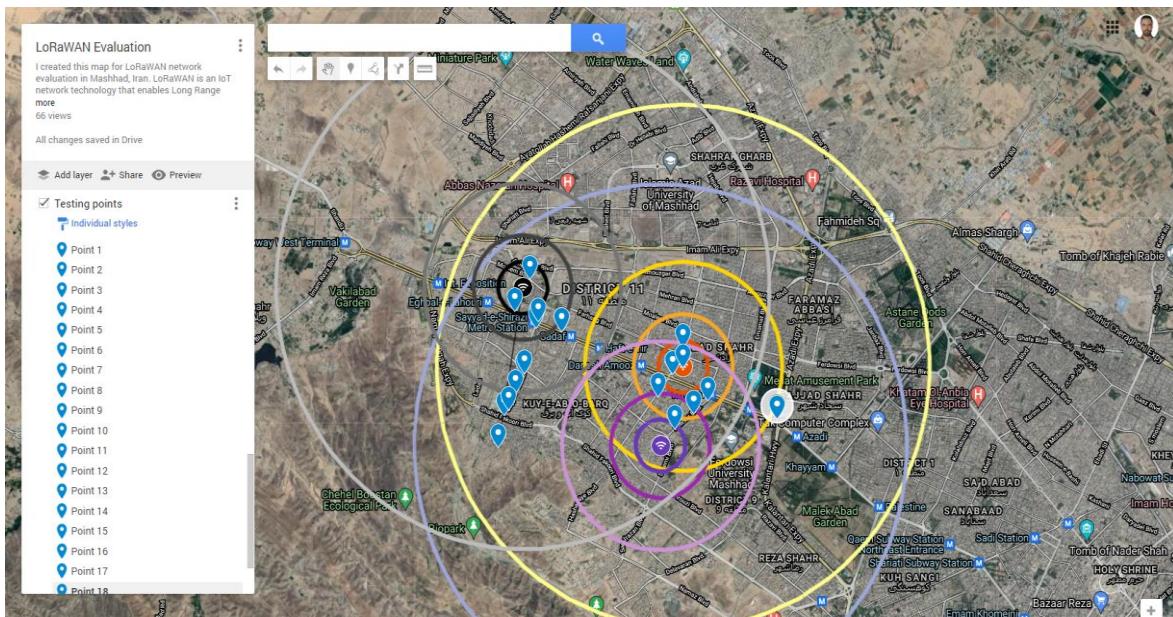
همانطور که در شکل ۱۴-۵ همپوشانی دروازه‌ها نشان داده شد، دروازه LoRa_Gateway2 از دو دروازه دیگر فاصله بیشتری دارد (تقریباً ۴ کیلومتر). در نتیجه ابتدا در محدوده LoRa_Gateway1 و LoRa_Gateway3 تست‌ها را انجام می‌دهیم. برای سناریوهای ثابت دروازه‌های ۱ و ۳، سه محدوده در نظر می‌گیریم. محدوده ۵۰۰ متری، ۱ کیلومتری و ۲ کیلومتری. در نقاط خاصی در این محدوده‌ها ایستاده و به ارسال داده از دستگاه‌های انتهایی gps-1 و gps-3 که به ترتیب دارای عامل گسترش ۷ و ۱۰ می‌باشند

می‌پردازیم. سپس در صورت دریافت داده در سرور کاربرد و سرور شبکه در پلتفرم آن‌ها را ثبت کرده و از نظر قدرت سیگنال دریافتی و همچنین نسبت سیگنال به نویز بررسی می‌کنیم. همچنین بسته‌های دریافتی از نظر تعداد بسته‌های دریافت شده از هر دستگاه انتهایی در هر ۱۰ ارسال آن دستگاه بررسی کرده و از این طریق نرخ دریافت بسته‌ها به صورت سالم را اندازه‌گیری می‌کنیم. از آنجایی که دروازه‌های LoRa_Gateway1 و LoRa_Gateway3 در ارتفاع نسبتاً کمی واقع شده‌اند برای اندازه‌گیری حداکثر برد شبکه و ویژگی‌های سیگنال‌های دریافتی در فواصل بالا از دروازه LoRa_Gateway2 که در طبقه ۹ ام واقع شده است استفاده می‌کنیم.

نکته مهم در مورد شبکه‌های بی‌سیم این است که خط دید^۱ در برد شبکه تاثیر بسیاری دارد. به عبارت دیگر اگر یک دستگاه انتهایی در مکانی قرار بگیرد که بتواند به صورت مستقیم آن‌تن دروازه دریافت کننده را ببیند و یا موانع در خط دید آن‌ها کم باشد، می‌توان تا فواصل زیادی داده ارسال و دریافت کرد و اگر موانع در مسیر زیاد باشد و خط دید پایینی داشته باشیم، قدرت سیگنال دریافتی به مراتب کاهش یافته و به دنبال آن برد شبکه نیز کاهش می‌یابد. با در نظر گرفتن این نکته انتظار می‌رود که محل قرارگیری دروازه‌ها بر روی پشت بام و مسیری که به سمت دروازه طی می‌کنیم در برد شبکه و قدرت سیگنال‌های دریافتی در دروازه‌ها تاثیرگذار باشد. در نتاریج حاصل از ارزیابی‌ها به صحت این قضیه پی می‌بریم.

برای ثبت اطلاعات ارزیابی از نقشه طراحی شده استفاده می‌کنیم. در این نقشه به تعداد ۲۰ نقطه تست در نظر گرفته شده است که ۸ نقطه در محدوده دروازه‌های LoRa_Gateway1 و LoRa_Gateway3 و ۱۲ نقطه در محدوده دروازه LoRa_Gateway1 ثبت شده است. لازم به ذکر است که برای ثبت نتایج نقاطی را انتخاب کردیم که در آن‌ها حداقل از یک دروازه داده دریافت کرده باشیم. در شکل ۱۵-۵ نقاطی که در آن‌ها ارزیابی انجام شده و نتایج ثبت شده است را با رنگ آبی مشاهده می‌کنید.

^۱ Line of sight



شکل ۱۵-۵ موقعیت نقاط آزمایش (رنگ آبی)

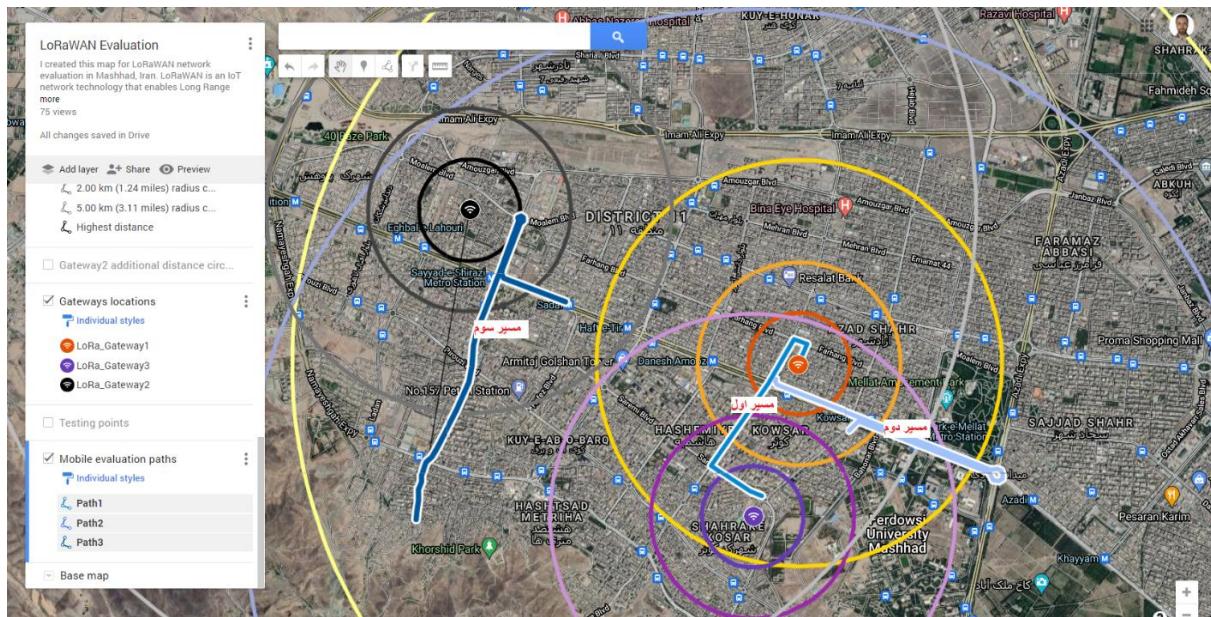
نقاط تست به صورتی در نظر گرفته شده‌اند که موارد زیر را پوشش می‌دهند:

- در محوطه ۵۰۰ متری از دروازه‌ها
- در محوطه ۱۰۰۰ متری در نقطه همپوشانی دروازه‌های ۱ و ۳ (بنفس و نارنجی)
- در خارج از محوطه ۲۰۰۰ متری از دروازه‌ها
- در محوطه ۲۰۰۰ متری دروازه شماره ۳ (بنفس)
- در محوطه ۳۰۰۰، ۲۰۰۰، ۱۰۰۰، ۵۰۰ متری از دروازه ۲ (مشکی)

حال که سناریوهای ثابت را تعریف کردیم، به تعریف سناریوهای متحرک می‌پردازیم و سپس نتاریج ارزیابی شبکه در این سناریوها را ارائه می‌دهیم.

۲-۲-۵ تعریف سناریوهای متحرک

در این بخش به تعریف سناریوهای متحرک می‌پردازیم. برای این امر، روی نقشه طراحی شده مسیرهایی که در آن قصد انجام آزمایش داریم را مشخص کرده‌ایم. سه مسیر برای سناریوهای متحرک در نظر گرفته شده است که مسیر اول و دوم در محدوده دروازه‌های LoRa_Gateway1 و LoRa_Gateway3 و مسیر سوم در محدوده دروازه LoRa_Gateway2 قرار دارد. در شکل ۱۶-۵ سه مسیر مورد نظر با رنگ‌های آبی مشخص شده است.



شکل ۱۶-۵ مسیرهای ارزیابی متحرک شبکه LoRaWAN

در مسیر اول که در شکل مشخص شده است، از محل دروازه شماره ۱ (نارنجی) به سمت دروازه شماره ۳ (بنفش) می‌رویم. در مسیر دوم، از سر خیابان کوثر تا به سمت پارک ملت رفته (در شکل فضای سبز رنگ بالای صفحه پارک ملت می‌باشد) و سپس آن مسیر را برگشته (حرکت به سمت غرب) و به سمت دروازه شماره ۱ (نارنجی) می‌رویم. در مسیر سوم، از نقطه شروع به سمت غرب رفته و در پل صیادشیرازی به سمت شمال می‌رویم، سپس دور زده و تا انتهای خیابان صیاد شیرازی به سمت جنوب حرکت می‌کنیم.

در این مسیرها چند پارامتر اصلی را بررسی می‌کنیم:

- تغییر نرخ بسته‌های دریافتی با تغییر سرعت حرکت
- تغییر قدرت سیگنال و نسبت سیگنال به نویز در حال حرکت نسبت به حالت ثابت
- بررسی پیوستگی دریافت داده در دروازه‌ها با مقایسه تعداد کل بسته‌های ارسال شده و بسته‌های دریافت شده در سرور کاربرد و سرور شبکه

حال که سناریوهای ثابت و متحرک را تعریف کردیم، در بخش بعدی به انجام آزمایش و ثبت و تحلیل نتایج ارزیابی می‌پردازیم. همچنین علاوه بر سناریوهای ذکر شده، در آزمایش مسیر سوم که در محدوده LoRa_Gateway2 انجام می‌شود، به بررسی حداکثر برد شبکه تا جایی که بتوانیم خواهیم پرداخت.

۳-۵ آزمایش‌ها و نتایج ارزیابی شبکه LoRaWAN

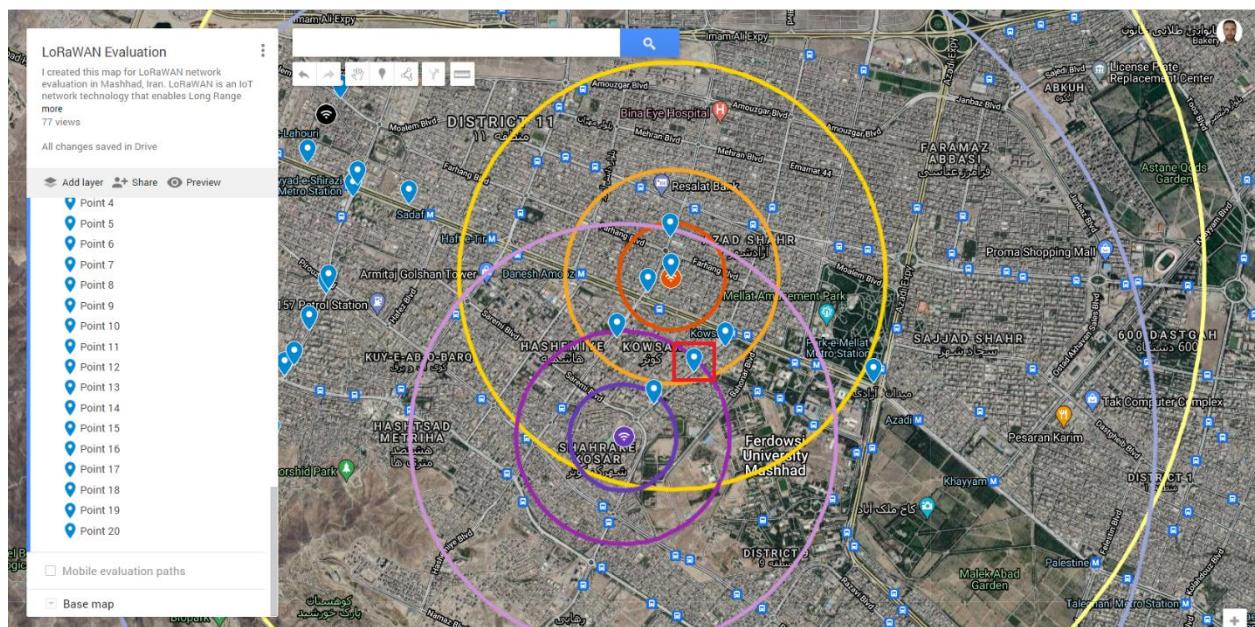
در این بخش به انجام آزمایش‌ها و ارزیابی‌ها در سناریوهای تعریف شده می‌پردازیم و نتایج حاصل از این ارزیابی‌ها را ثبت می‌کنیم. در ابتدا به آزمایشات و نتایج سناریوهای ثابت و سپس سناریوهای متحرک می‌پردازیم و در ادامه با رسم چند نمودار نتایج به دست آمده را تحلیل می‌کنیم.

۱-۳-۵ انجام آزمایش‌های سناریوهای ثابت

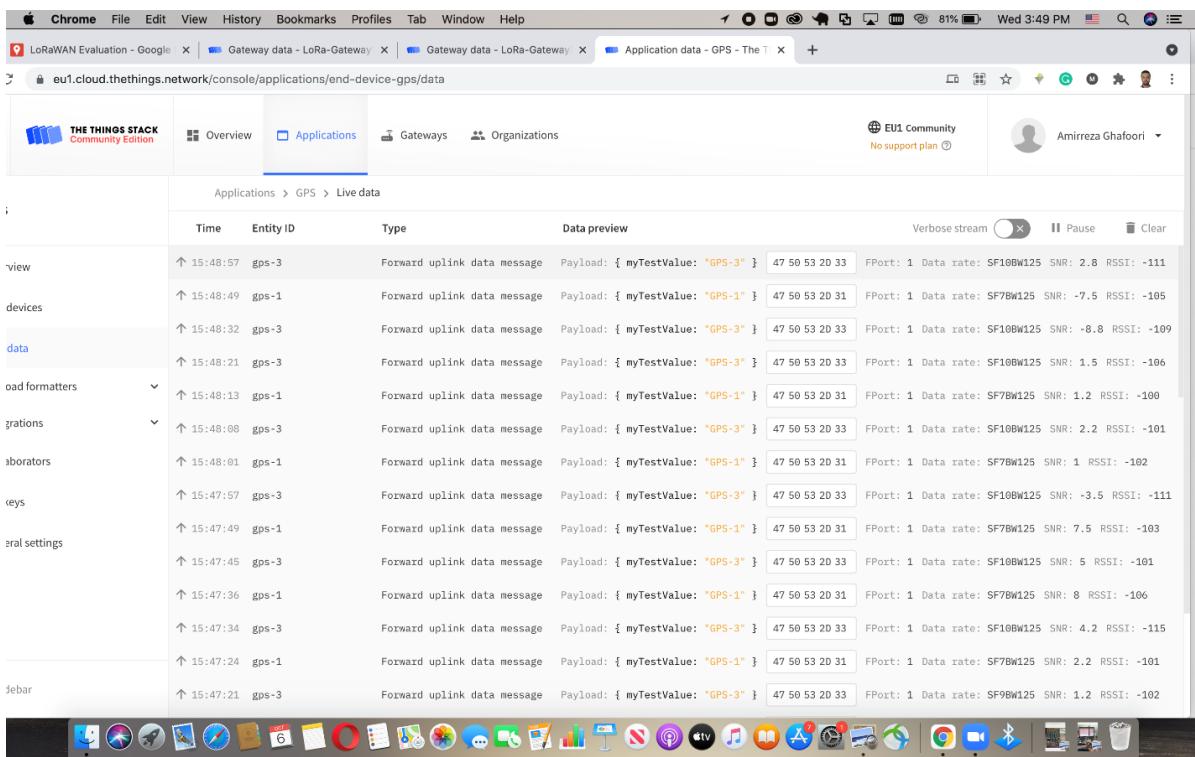
برای ارزیابی سناریوهای ثابت، به انجام آزمایش در نقاط مشخص شده در نقشه پرداختیم و نتایج حاصل را استخراج کردیم. در انجام آزمایش‌ها از دو دستگاه انتهایی با شناسه gps-1 و gps-3 با عامل‌های گسترش ۷ و ۱۰ استفاده کردیم. استفاده از دو عامل گسترش مختلف همانطور که در توضیحات شبکه LoRaWAN گفته شد، باعث جلوگیری از تداخل سیگنال‌ها به علت متعامد بودن عامل‌های گسترش مختلف می‌شود. در ادامه تصاویری از تعدادی از نقاط انجام آزمایش‌های ثابت و بسته‌های دریافتی در سرور کاربرد و سرور شبکه در این نقاط را مشاهده می‌کنیم. موقعیت هر تصویر در نقشه زیر آن با کادر قرمز مشخص شده است.



شکل ۱۷-۵ محدوده ۱۰۰۰ متری دروازه ۱ و ۳ (نقطه همپوشانی)



شکل ۱۸-۵ محدوده ۱۰۰۰ متری دروازه ۱ و ۳ (نقطه همپوشانی) روی نقشه



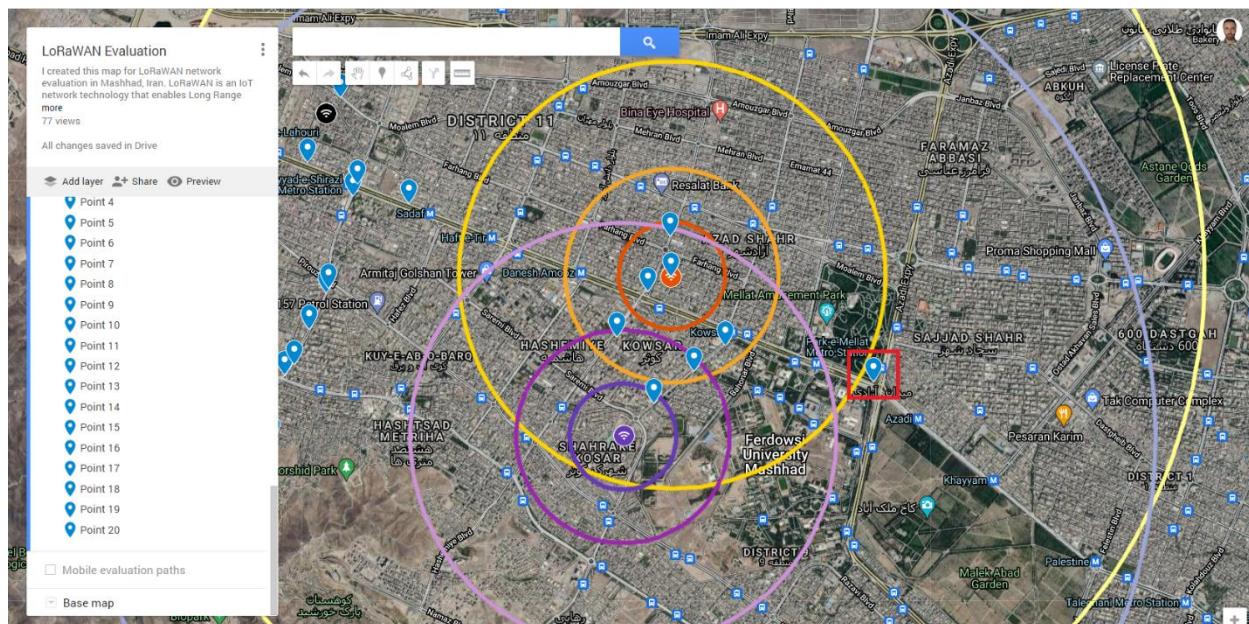
شکل ۵-۱۹- بسته‌های دریافت شده در محدوده ۱۰۰۰ متری دروازه ۱ و ۳

لازم به ذکر است که بسته‌های دریافت شده در محدوده ذکر شده در تصاویر بالا توسط دروازه LoRa_Gateway3 (دروازه بنفش رنگ روی نقشه) دریافت شده است. ور دروازه نارنجی در این محدوده بسته‌ای دریافت نمی‌کرد. این امر می‌تواند به دلیل ارتفاع کمتر محل استقرار دروازه نارنجی نسبت به دروازه بنفش باشد.



شکل ۲۰-۵ خارج از محدوده ۲۰۰۰ متری دروازه ۱ و ۳

موقعیت این نقطه در نقشه زیر قابل مشاهده است.



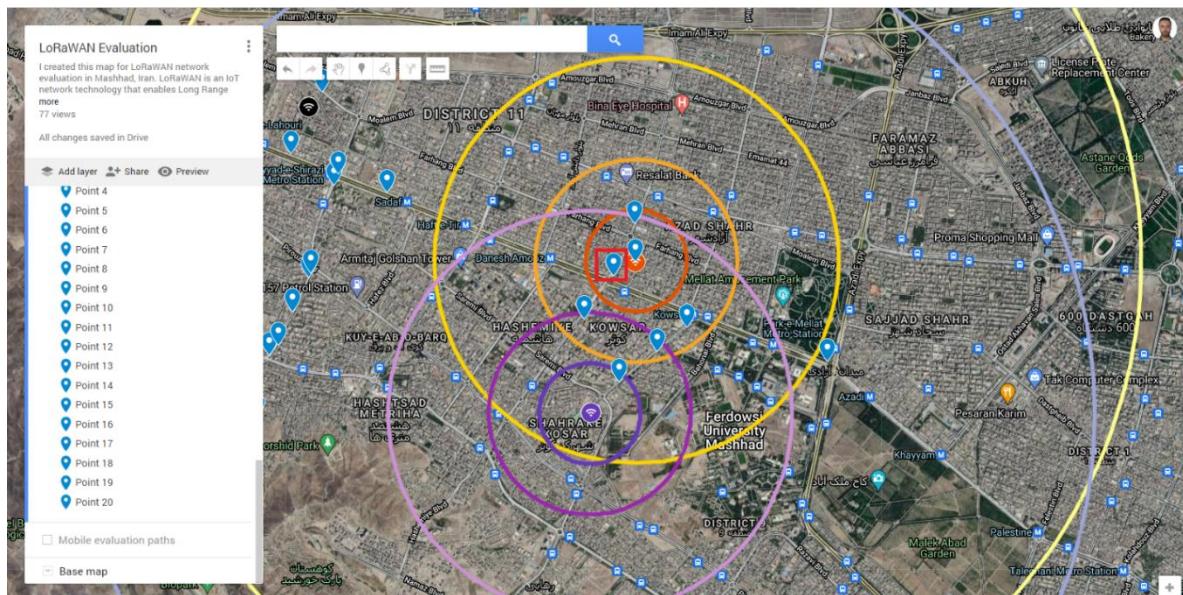
شکل ۲۱-۵ خارج از محدوده ۲۰۰۰ متری دروازه ۱ و ۳ روی نقشه

در این نقطه هیچ بسته‌ای توسط دروازه‌های ۱ و ۳ دریافت نشد.

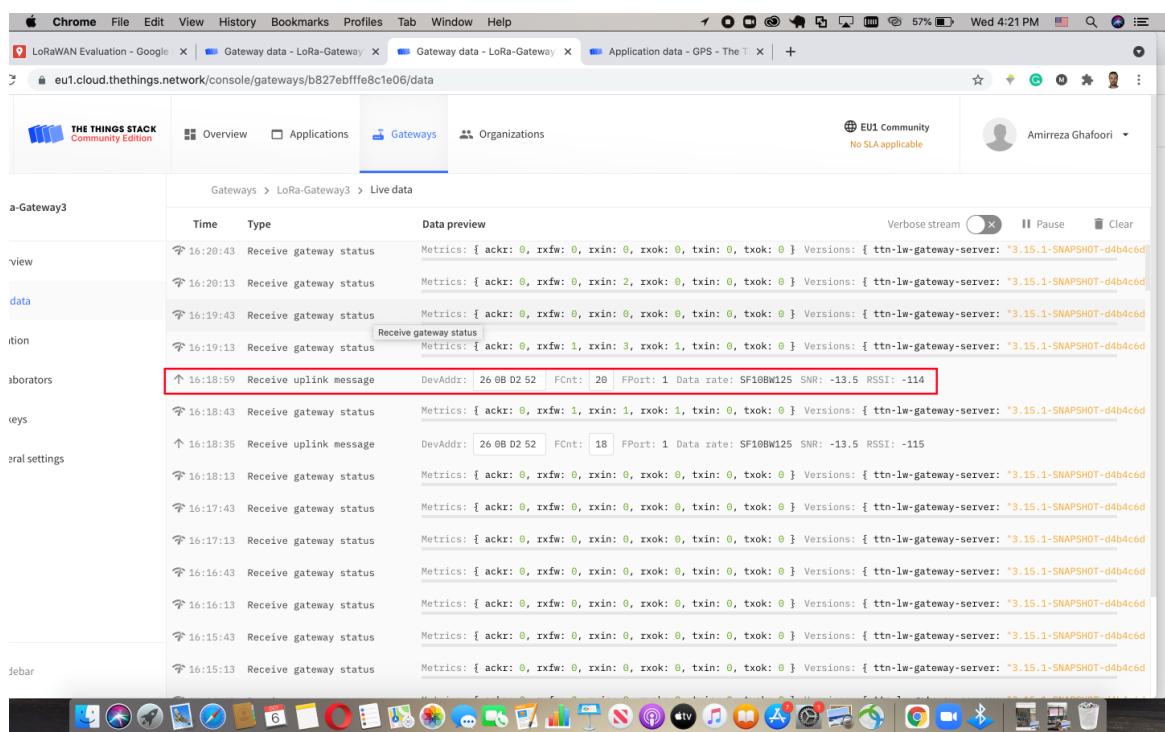


شکل ۲۴-۵ محدوده ۵۰۰ متری دروازه ۱ و ۲۰۰۰ متری دروازه ۳

در این محدوده که موقعیت آن در شکل ۲۳-۵ مشاهده می‌شود، بسته‌های توسط دروازه شماره ۱ (نارنجی) دریافت می‌شدند. نکته جالب دریافت یک بسته توسط دروازه شماره ۳ (بنفش) در این محدوده با قدرت سیگنال بسیار پایین می‌باشد که در شکل ۲۴-۵ نمایش داده شده است.



شکل ۲۳-۵ محدوده ۵۰۰ متری دروازه ۱ و ۲۰۰۰ متری دروازه ۳ روی نقشه



شکل ۲۴-۵ دریافت یک بسته در محدوده ۵۰۰ متری دروازه ۱ و ۲۰۰۰ متری دروازه ۳ توسط دروازه ۳

همچنین در شکل بالا مشاهده می‌کنیم که یک بسته دیگر نیز در ساعت ۱۶:۱۸:۳۵ توسط دروازه ۳ دریافت شده است، اما در سرور کاربرد این بسته دیده نمی‌شود و علت آن دریافت همان بسته با قدرت سیگنال و

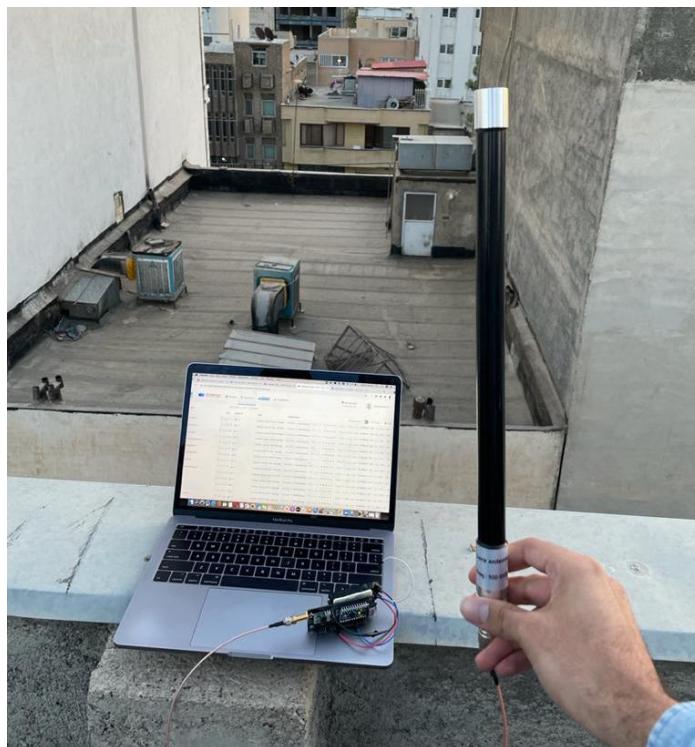
نسبت سیگنال به نویز بهتر توسط دروازه شماره ۱ می‌باشد. در شکل ۲۵-۵ بسته دریافت شده در این زمان در سرور کاربرد از دستگاه انتهایی GPS-3 را مشاهده می‌کنید.

Time	Entity ID	Type	Data preview
↑ 16:19:35	gps-1	Forward uplink data message	Payload: { myTestValue: "GPS-1" } 47 50 53 2D 31 FPort: 1 Data rate: SF7BW125 SNR: 2 RSSI: -103
↑ 16:19:24	gps-3	Forward uplink data message	Payload: { myTestValue: "GPS-3" } 47 50 53 2D 33 FPort: 1 Data rate: SF10BW125 SNR: 0.2 RSSI: -107
↑ 16:19:23	gps-1	Forward uplink data message	Payload: { myTestValue: "GPS-1" } 47 50 53 2D 31 FPort: 1 Data rate: SF7BW125 SNR: 6.5 RSSI: -102
↑ 16:19:12	gps-3	Forward uplink data message	Payload: { myTestValue: "GPS-3" } 47 50 53 2D 33 FPort: 1 Data rate: SF10BW125 SNR: -2 RSSI: -105
↑ 16:19:10	gps-1	Forward uplink data message	Payload: { myTestValue: "GPS-1" } 47 50 53 2D 31 FPort: 1 Data rate: SF7BW125 SNR: 1.2 RSSI: -102
↑ 16:18:59	gps-3	Forward uplink data message	Payload: { myTestValue: "GPS-3" } 47 50 53 2D 33 FPort: 1 Data rate: SF10BW125 SNR: -13.5 RSSI: -114
↑ 16:18:48	gps-3	Forward uplink data message	Payload: { myTestValue: "GPS-3" } 47 50 53 2D 33 FPort: 1 Data rate: SF10BW125 SNR: -14.8 RSSI: -111
↑ 16:18:46	gps-1	Forward uplink data message	Payload: { myTestValue: "GPS-1" } 47 50 53 2D 31 FPort: 1 Data rate: SF7BW125 RSSI: -108
↑ 16:18:35	gps-3	Forward uplink data message	Payload: { myTestValue: "GPS-3" } 47 50 53 2D 33 FPort: 1 Data rate: SF10BW125 SNR: -8.8 RSSI: -108
↑ 16:18:24	gps-3	Forward uplink data message	Payload: { myTestValue: "GPS-3" } 47 50 53 2D 33 FPort: 1 Data rate: SF10BW125 SNR: -6.5 RSSI: -115
↑ 16:18:22	gps-1	Forward uplink data message	Payload: { myTestValue: "GPS-1" } 47 50 53 2D 31 FPort: 1 Data rate: SF7BW125 SNR: -6.2 RSSI: -115
↑ 16:18:12	gps-3	Forward uplink data message	Payload: { myTestValue: "GPS-3" } 47 50 53 2D 33 FPort: 1 Data rate: SF10BW125 SNR: -12.2 RSSI: -115
↑ 16:18:00	gps-3	Forward uplink data message	Payload: { myTestValue: "GPS-3" } 47 50 53 2D 33 FPort: 1 Data rate: SF10BW125 SNR: -12.2 RSSI: -113
↑ 16:17:48	gps-3	Forward uplink data message	Payload: { myTestValue: "GPS-3" } 47 50 53 2D 33 FPort: 1 Data rate: SF10BW125 SNR: -6.2 RSSI: -114

شکل ۲۵-۵ دریافت بسته با مشخصات بهتر در سرور کاربرد

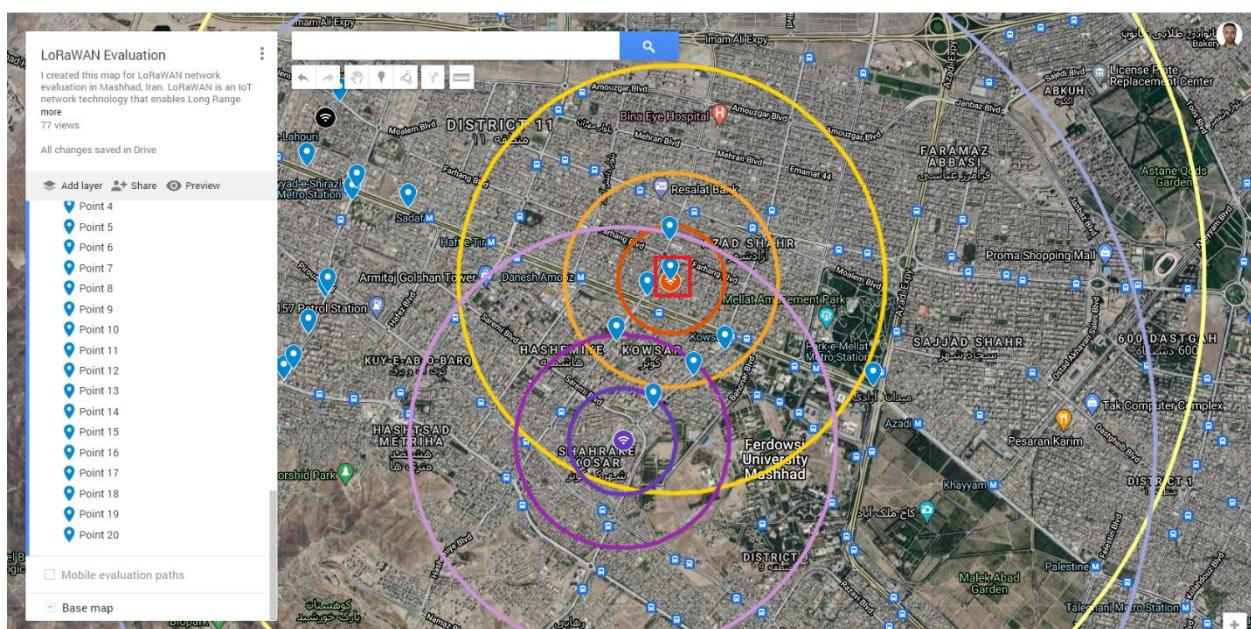
همانطور که در شکل بالا قابل مشاهده است، بسته دریافتی در سرور کاربرد دارای قدرت سیگنال ۱۰.۸ و نسبت سیگنال به نویز ۸.۸ می‌باشد که نسبت به مشخصات بسته دریافتی در دروازه شماره ۳ بهتر است. در اینجا نحوه رسیدگی به چند بسته دریافتی و حذف بسته‌های اضافی در سرور شبکه را مشاهده کردیم.

در شکل ۲۶-۵ نیز ما در محل قرارگیری دروازه شماره ۱ قرار گرفتیم (پشت بام ساختمان در نقطه نارنجی) و با اتصال آتن بزرگ به دستگاه انتهایی قادر به ارسال داده برای دروازه در نقطه بنفش شدیم.



شکل ۵-۲۶ ارسال داده برای دروازه شماره ۱ از فاصله ۱۵۰۰ متری آن

موقعیت قرار گیری ما در شکل بالا روی نقشه در شکل ۷-۵ قابل مشاهده است.



شکل ۷-۵ محدوده ۲۰۰۰ متری (فاصله ۱۵۰۰ متری) از دروازه شماره ۳ (بنفس)

داده‌های دریافت شده در سرور کاربرد که توسط دروازه شماره ۳ به سرور شبکه ارسال شده بود در شکل زیر قابل مشاهده می‌باشد.

Time	Entity ID	Type	Data preview	FPort	Data rate	SNR	RSSI	
↑ 16:55:31	gps-3	Forward uplink data message	Payload: { myTestValue: "GPS-3" }	47 50 53 20 33	FPort: 1	Data rate: SF9BW125	SNR: -0.8	RSSI: -113
↑ 16:55:20	gps-3	Forward uplink data message	Payload: { myTestValue: "GPS-3" }	47 50 53 20 33	FPort: 1	Data rate: SF9BW125	SNR: -5.2	RSSI: -105
↑ 16:55:08	gps-3	Forward uplink data message	Payload: { myTestValue: "GPS-3" }	47 50 53 20 33	FPort: 1	Data rate: SF10BW125	SNR: -6.2	RSSI: -107
↑ 16:54:56	gps-3	Forward uplink data message	Payload: { myTestValue: "GPS-3" }	47 50 53 20 33	FPort: 1	Data rate: SF10BW125	SNR: -6.2	RSSI: -113
↑ 16:54:31	gps-3	Forward uplink data message	Payload: { myTestValue: "GPS-3" }	47 50 53 20 33	FPort: 1	Data rate: SF10BW125	SNR: 3.2	RSSI: -103
↑ 16:54:19	gps-3	Forward uplink data message	Payload: { myTestValue: "GPS-3" }	47 50 53 20 33	FPort: 1	Data rate: SF10BW125	SNR: 5.8	RSSI: -102
↑ 16:54:06	gps-3	Forward uplink data message	Payload: { myTestValue: "GPS-3" }	47 50 53 20 33	FPort: 1	Data rate: SF10BW125	SNR: -11.2	RSSI: -111
↑ 16:53:54	gps-3	Forward uplink data message	Payload: { myTestValue: "GPS-3" }	47 50 53 20 33	FPort: 1	Data rate: SF10BW125	SNR: -10.8	RSSI: -113
↑ 16:53:42	gps-3	Forward uplink data message	Payload: { myTestValue: "GPS-3" }	47 50 53 20 33	FPort: 1	Data rate: SF10BW125	SNR: -8.2	RSSI: -112
↑ 16:53:30	gps-3	Forward uplink data message	Payload: { myTestValue: "GPS-3" }	47 50 53 20 33	FPort: 1	Data rate: SF10BW125	SNR: -7	RSSI: -111
↑ 16:53:19	gps-3	Forward uplink data message	Payload: { myTestValue: "GPS-3" }	47 50 53 20 33	FPort: 1	Data rate: SF10BW125	SNR: 1	RSSI: -107
↑ 16:53:07	gps-3	Forward uplink data message	Payload: { myTestValue: "GPS-3" }	47 50 53 20 33	FPort: 1	Data rate: SF10BW125	SNR: 0.5	RSSI: -103
16:52:41		Console: Stream reconnected	The stream connection has been re-established					
16:51:45		Console: Network error	The stream connection was lost due to a network error					

شکل ۲۸-۵ ارسال داده از محدوده ۲۰۰۰ متری (فاصله ۱۵۰۰ متری) از دروازه شماره ۳ (بنفس)

تا به اینجا تصاویر برخی از نقاط انجام آزمایش را مشاهده کردیم. در ادامه به بررسی نتایج ارزیابی ورسم نمودارهای مورد نظر خواهیم پرداخت.

۲-۳-۵ نتایج ارزیابی شبکه در سناریوهای ثابت

در این قسمت با استفاده از نتایجی که در آزمایش‌های بخش قبل به دست آوردیم، به ارزیابی شبکه LoRaWAN می‌پردازیم. ابتدا نتایج حاصل را در یک جدول خلاصه کرده و سپس نمودارهای مربوطه را برای مصورسازی بهتر نتایج رسم خواهیم کرد. پارامترهایی که در جدول مورد بررسی قرار گرفته‌اند به صورت زیر می‌باشند:

- حداقل و حداکثر قدرت سیگنال دریافتی در محدوده‌های مختلف
- حداقل و حداکثر نسبت سیگنال به نویز در محدوده‌های مختلف
- تعداد بسته‌های دریافت شده در سرور کاربرد از هر ۱۰ بسته ارسالی از دستگاه‌های انتهایی

از آنجایی که حداکثر بردی که توانستیم به آن بررسیم ۳.۱ کیلومتر بود، محدوده‌های فاصله را به صورت ۵۰۰ متر، ۱۰۰۰ متر، ۲۰۰۰ متر و ۳۰۰۰ متر تعریف می‌کنیم. سپس با توجه به نتایج به دست آمده برای هر دستگاه و هر دروازه (در صورت دریافت داده در آن دروازه) به تشکیل جداول به شکل زیر می‌پردازیم. دروازه شماره ۱ (نارنجی رنگ) تنها در محدوده ۵۰۰ متری خود داده دریافت می‌کرد، در در تحلیل نتایج دروازه شماره ۱ و ۳ را با هم ادغام می‌کنیم و نتایج حاصل از دو دروازه را با توجه به داده‌های دریافت شده در سرور کاربرد بررسی می‌کنیم. ستون محدوده دستگاه انتهایی نشان می‌دهد که دستگاه انتهایی در محدوده کدام دایره فاصله در نقشه نسبت به دروازه شبکه واقع شده است.

جدول ۲-۵ نتایج ارزیابی دستگاه انتهایی اول با شناسه ۱-gps

قدرت سیگنال		درباره دروازه (dBm)		نسبت سیگنال به نویز (dB)		تعداد بسته‌های دریافت شده از فاصله از دروازه (m)		پهنای باند (kHz)		توان ارسالی (dBm)		عامل گسترش		محدوده دستگاه انتهایی		
پیوین	بلازرن	پیوین	بلازرن	پیوین	بلازرن	فاصله از دروازه	(m)	پهنای باند	(kHz)	توان ارسالی	(dBm)	عامل گسترش	دایره اول	دایره دوم	دایره سوم	دایره چهارم
-۱۰۴	-۸۷	۶	۷	۹	۹	۴۵۰	۱۲۵	۱۴	۱۴	۷	۷	۷	دایره اول	دایره دوم	دایره سوم	دایره چهارم
-۱۰۶	-۱۰۰	-۷.۵	۵	۶	۶	۹۰۰	۱۲۵	۱۴	۱۴	۷	۷	۷	دایره اول	دایره دوم	دایره سوم	دایره چهارم
-	-	-	-	-	-	۱۵۰۰	۱۲۵	۱۴	۱۴	۷	۷	۷	دایره اول	دایره دوم	دایره سوم	دایره چهارم
-	-	-	-	-	-	۲۴۰۰	۱۲۵	۱۴	۱۴	۷	۷	۷	دایره اول	دایره دوم	دایره سوم	دایره چهارم

جدول ۳-۵ نتایج ارزیابی دستگاه انتهایی اول با شناسه gps-3

محدوده دستگاه انتهایی										
قدرت سیگنال دریافتی در دروازه (dBm)	نسبت سیگنال به نویز (dB)	تعداد بسته‌های دریافت شده از فاصله از دروازه (m)	توان ارسالی (dBm)	عامل گسترش	پهنای باند (KHz)	فناوری	بازه ارتباطی با این پهنای باند	بازه ارتباطی با این پهنای باند	نوع اسکن	آزمایش
پایین	بالاترین	پایین	بالاترین	پایین	بالاترین	بالاترین	پایین	بالاترین	نیز	دایره اول
-۹۴	-۸۴	۶.۵	۹	۱۰	۴۵۰	۱۲۵	۱۴	۱۰		دایره اول
-۱۱۱	-۱۰۱	-۳.۵	۵	۹	۹۰۰	۱۲۵	۱۴	۱۰		دایره دوم
-۱۱۳	-۱۰۳	-۱۱.۲	۳.۸	۲	۱۵۰۰	۱۲۵	۱۴	۱۰		دایره سوم
-	-	-	-	۰	۲۴۰۰	۱۲۵	۱۴	۱۰		دایره چهارم

حال به سراغ دروازه شماره ۲ (رنگ مشکی) می‌رویم. در آزمایش‌های محدوده دروازه شماره ۲ از آتن بزرگ بر روی دستگاه انتهایی با شناسه gps-5 استفاده کردیم و بالاتری برد در کل آزمایش به اندازه ۳.۱ کیلومتر را نیز به دست آوردیم.

جدول ۵-۴ نتایج ارزیابی دستگاه انتهایی اول با شناسه ۵-gps در محدوده دروازه شماره ۲

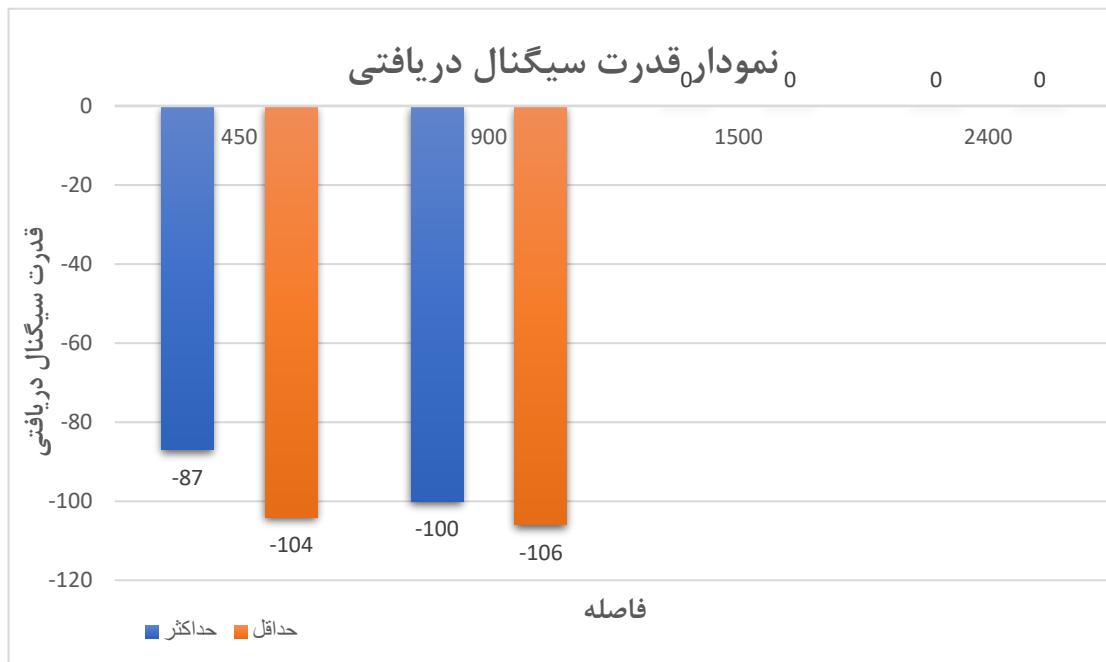
محدوده دستگاه انتهایی	عامل گسترش	توان ارسالی (dBm)	پهنای باند (kHz)	فاصله از دروازه (m)	تعداد بسته‌های دریافت شده از دستگاه	نویز (dB)	نسبت سیگنال به نویز (dBm)	دریافتی در دروازه (dBm)	قدرت سیگنال (dBm)	پایین بالاترین	پایین بالاترین	قدرت سیگنال
دایره اول	۱۰	۱۴	۱۲۵	۴۹۰	۱۰	۱۰	۱۰	-۹۶	-۷۰	۶	۱۰	۱۰
دایره دوم	۱۰	۱۴	۱۲۵	۷۰۰	۱۰	۸	-۳.۵	-۱۰۰	-۸۳	-۳.۵	-۸.۵	۸
دایره سوم	۱۰	۱۴	۱۲۵	۱۶۵۰	۸	۵	-۸.۵	-۱۱۳	-۱۰۵	-۸.۵	-۱۰.۵	۵
دایره چهارم	۱۰	۱۴	۱۲۵	۳۱۰۰	۶	۴	-۱۰	-۱۱۹	-۱۰۴	-۱۰	-۱۰.۴	۴

حال با توجه به نتایج به دست آمده و جداول بالا به رسم نمودارهای این جداول می‌پردازیم. برای هر

دستگاه انتهایی سه نمودار مختلف ترسیم می‌کنیم که به شرح زیر می‌باشد:

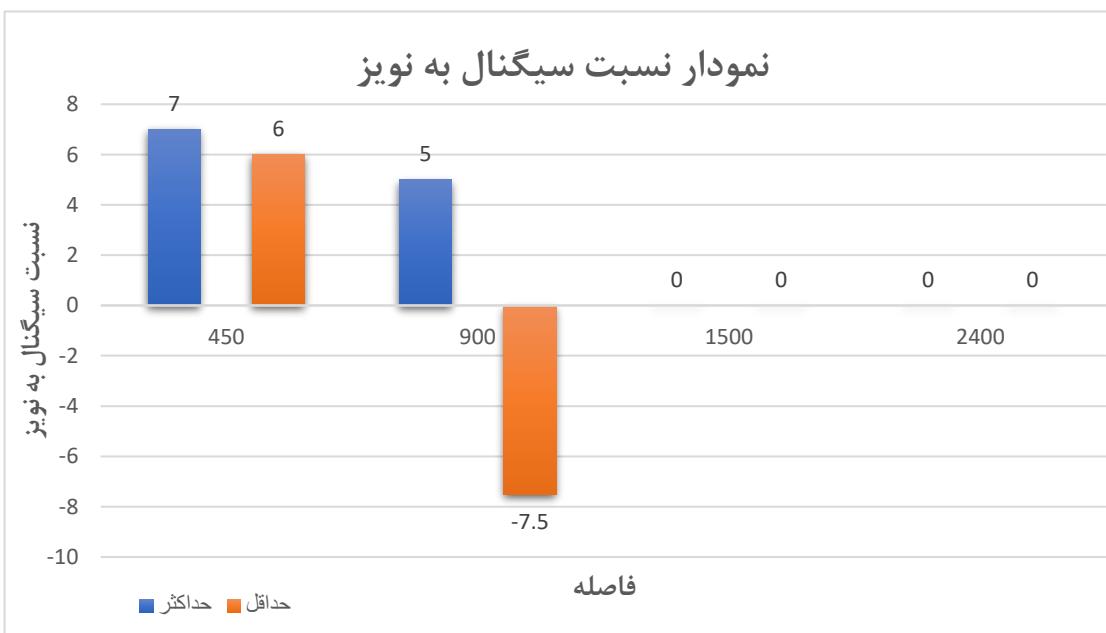
- نمودار حداکثر و حداقل قدرت سیگنال دریافتی در فواصل مختلف
- نمودار حداکثر و حداقل نسبت سیگنال به نویز در فواصل مختلف
- نمودار تعداد بسته‌های دریافت شده از هر ۱۰ بسته ارسال شده در فواصل مختلف

ابتدا نمودارهای دستگاه انتهایی اول را با شناسه gps-1 رسم می‌کنیم. در شکل ۲۹-۵ نمودار قدرت سیگنال دریافتی دستگاه انتهایی را در فواصل مختلف مشاهده می‌کنید.



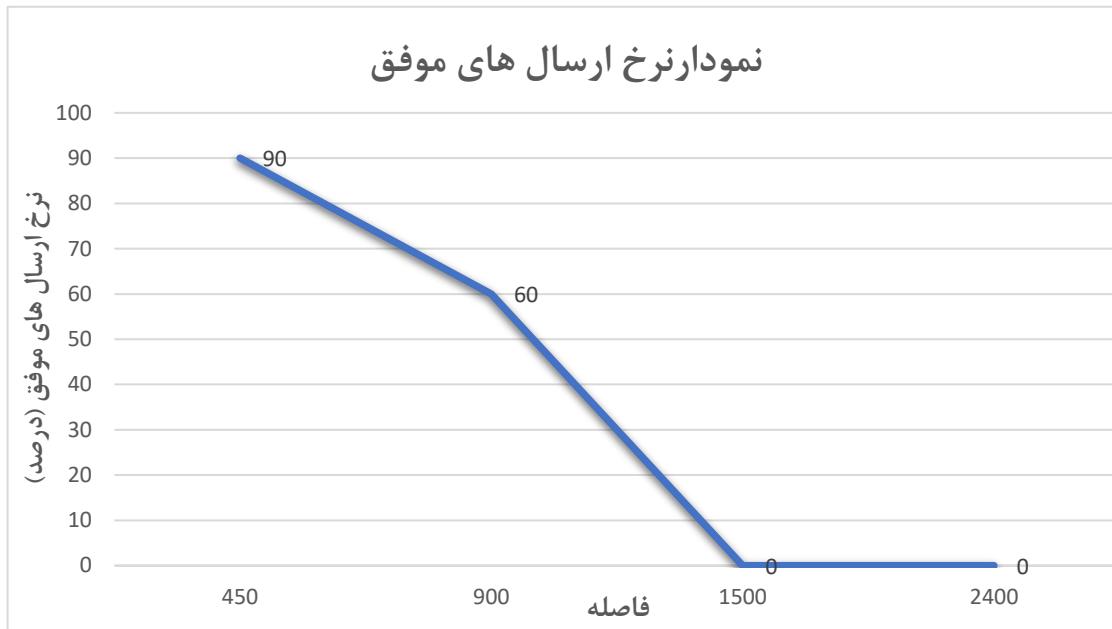
شکل ۲۹-۵ نمودار قدرت سیگنال دریافتی برای gps-1

در شکل ۳۰-۵ نمودار نسبت نویز به سیگنال در فواصل مختلف مشاهده می‌کنید.



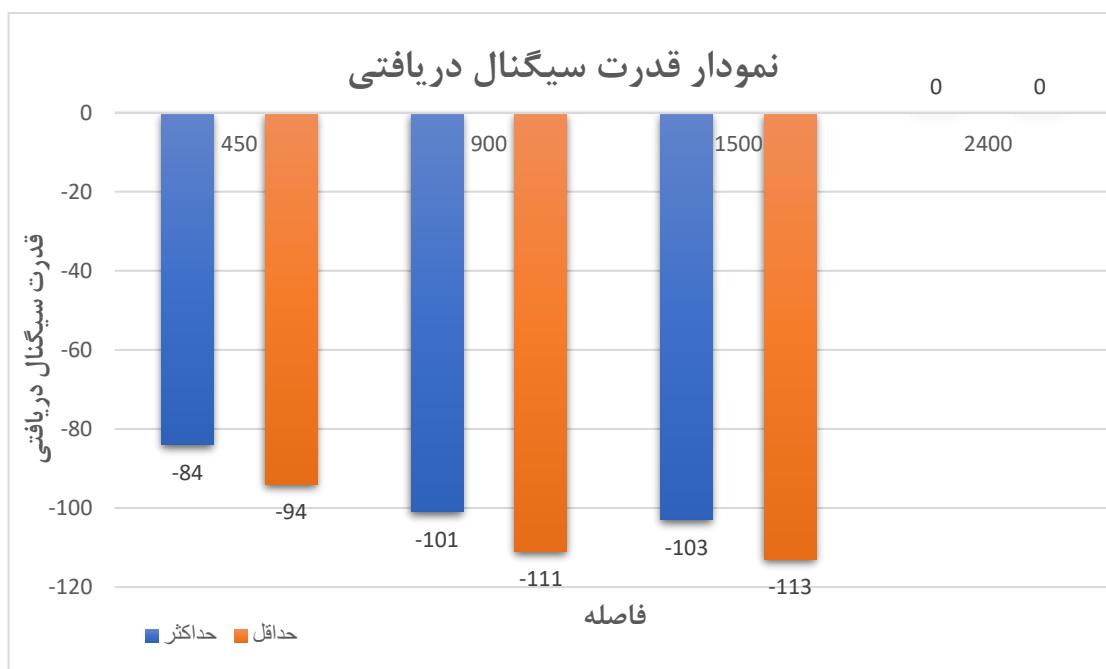
شکل ۳۰-۵ نمودار نسبت سیگنال به نویز برای gps-1

در شکل ۳۱-۵ نمودار تعداد بسته‌های دریافت شده از هر ۱۰ بسته ارسال شده را برای gps-1 مشاهده می‌کنید.



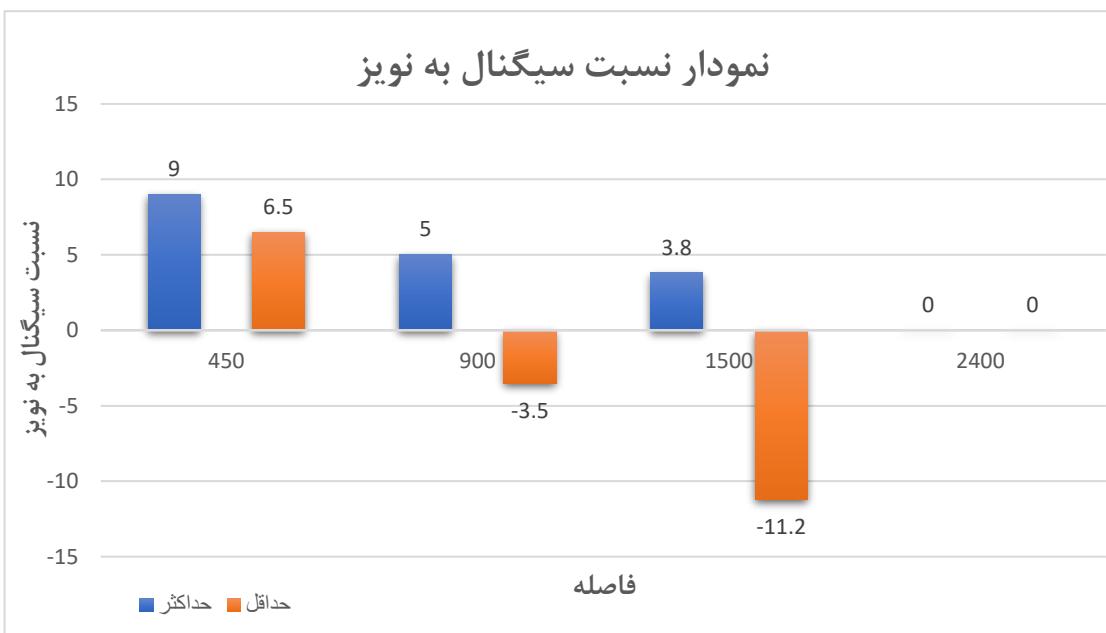
شکل ۳۱-۵ نمودار درصد بسته‌های دریافت شده نسبت به بسته‌های ارسال شده توسط ۱ gps

در ادامه نمودارهای مربوط به gps-3 را مشاهده خواهیم کرد. این دستگاه انتهاهایی دارای گسترش ۱۰ بوده و در نتیجه نتایج بهتری نسبت به ۱ gps-1 خواهد داشت. در شکل ۳۲-۵ نمودار قدرت سیگنال دریافتی دستگاه انتهاهایی را در فواصل مختلف مشاهده می‌کنید.



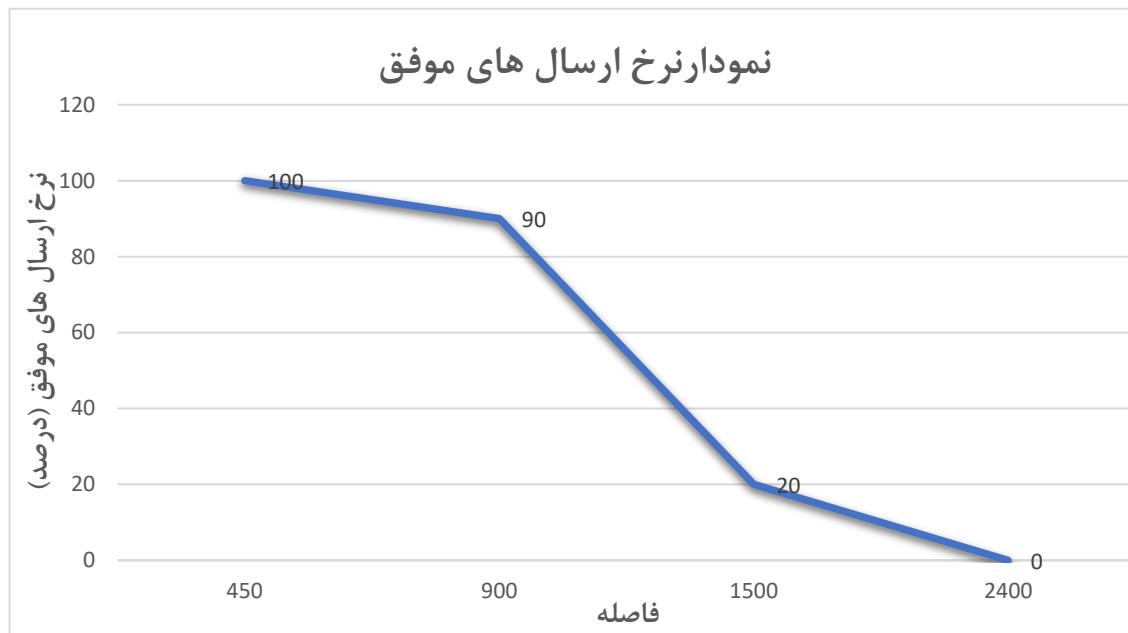
شکل ۳۲-۵ نمودار قدرت سیگنال دریافتی برای ۳gps

در شکل ۳۳-۵ نمودار نسبت به سیگنال به نویز رای دستگاه انتهایی ۳gps را مشاهده می کنید.



شکل ۳۳-۵ نمودار نسبت سیگنال به نویز برای ۳gps

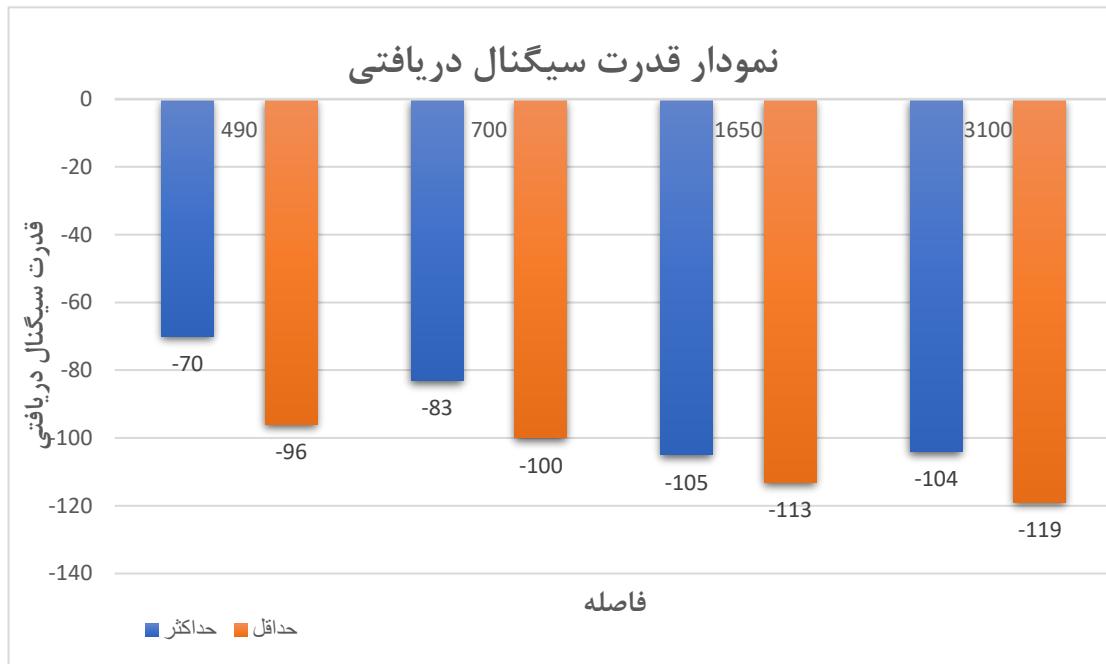
در شکل ۳۴-۵ نمودار تعداد بسته‌های دریافت شده از هر ۱۰ بسته ارسال شده توسط دستگاه انتهايی gps-3 را مشاهده می‌کنيد.



شکل ۳۴-۵ نمودار درصد بسته‌های دریافت شده نسبت به بسته‌های ارسال شده توسط gps-3

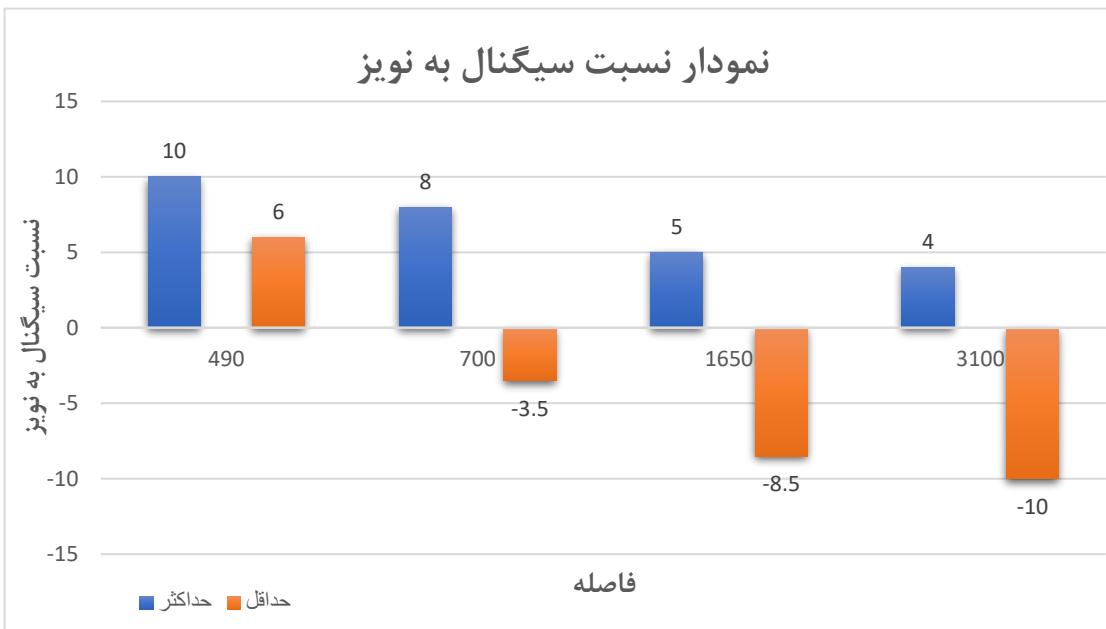
در نهايit نمودارهای مربوط به دستگاه انتهايی gps-5 را مشاهده خواهيد کرد. اين دستگاه انتهايی داراي عامل گسترش ۱۰ می باشد اما تفاوتش با دستگاه انتهايی gps-3 در اين است که بجای آنتن کوچک از آنتن بزرگ برای ارسال داده‌های آن استفاده کردیم. همچنین داده‌های اين دستگاه انتهايی را توسط دروازه شماره ۲ (LoRa_Gateway2 یا سیاه رنگ روی نقشه) که در ارتفاع بالاتری نسبت به دو دروازه دیگر قرار داشت دریافت کردیم. توسط دستگاه انتهايی gps-5 و دروازه LoRa_Gateway2 بهترین برد ارتباطات معال ۳.۱ کیلومتر به دست آوردیم. توجه کنید که فواصل در نظر گرفته شده برای رسم نمودارهای این دستگاه با دو دستگاه قبلی متفاوت می باشد.

در شکل ۳۵-۵ نمودار قدرت سیگنال دریافتی را برای gps-5 مشاهده می‌کنید.



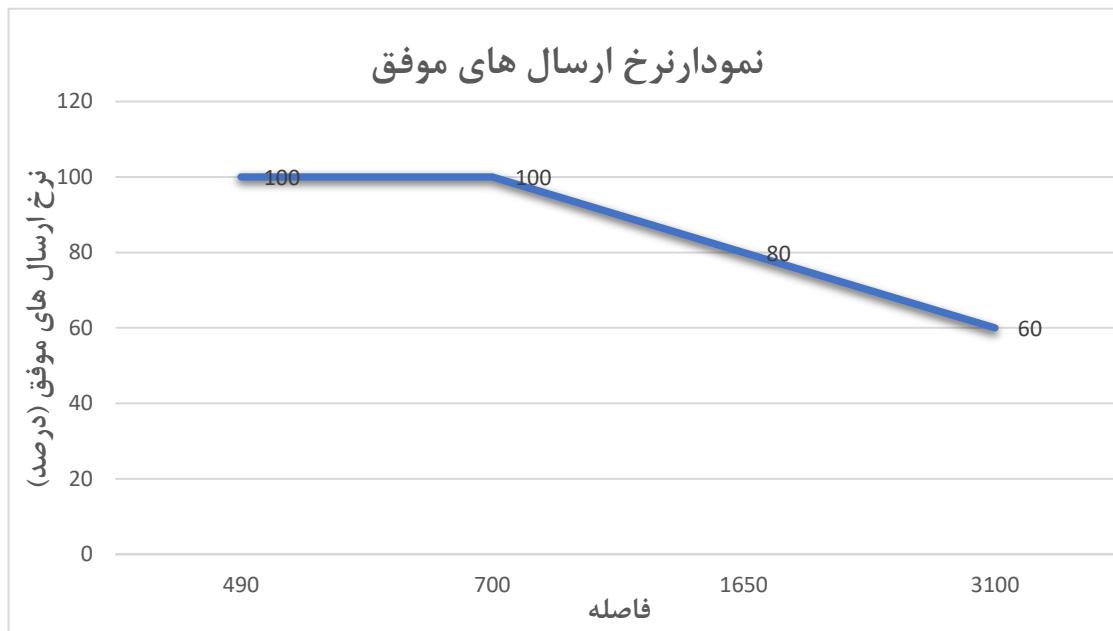
شکل ۳۵-۵ نمودار قدرت سیگنال دریافتی برای 5

در شکل ۳۶-۵ نمودار نسبت سیگنال به نویز را برای دستگاه انتهایی gps-5 مشاهده می‌کنید.



شکل ۳۶-۵ نمودار نسبت سیگنال به نویز برای 5

در آخر نیز نمودار تعداد بسته‌های دریافت شده نسبت به هر ۱۰ بسته ارسال شده توسط دستگاه انتهايی gps-5 را مشاهده می‌کنید.



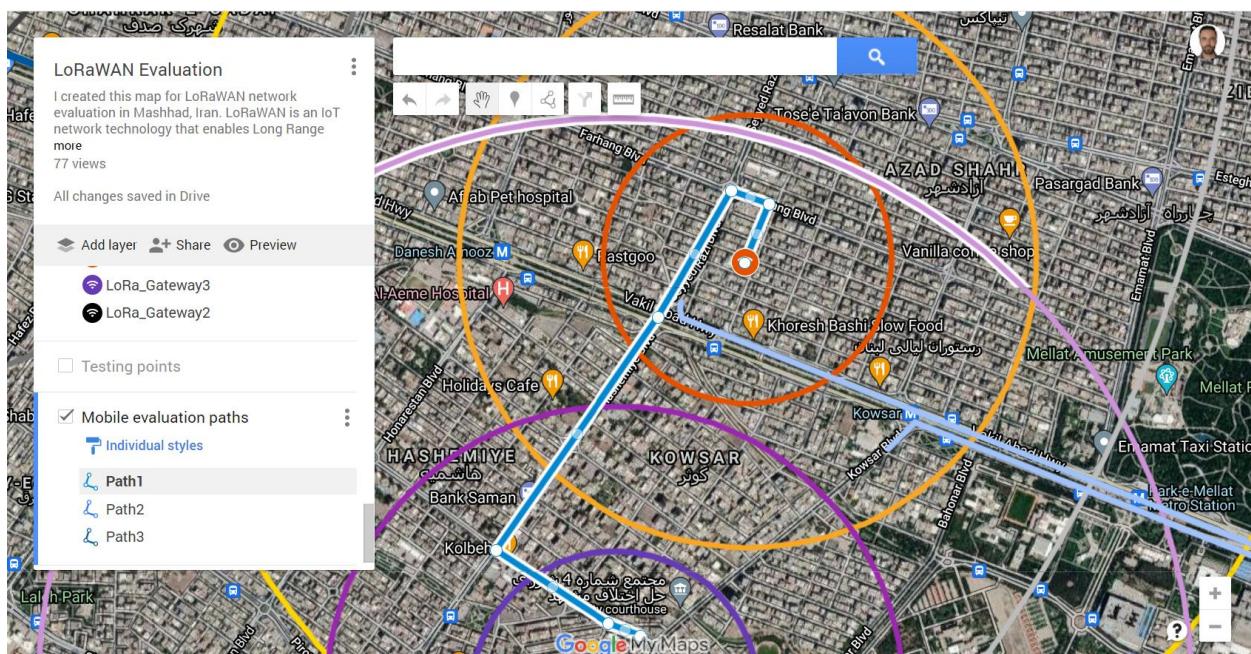
شکل ۳۷-۵ نمودار بسته‌های دریافت شده به ازای هر ۱۰ بسته ارسال شده توسط GPS-5

تا به اینجا نتایج ارزیابی شبکه در سناریوهای ثابت را بررسی کردیم. در ادامه به بررسی آزمایش‌های انجام شده برای سناریوهای متحرک و نتایج ارزیابی آن‌ها می‌پردازیم.

۳-۳-۵ انجام آزمایش‌های سیناریوهای متحرک

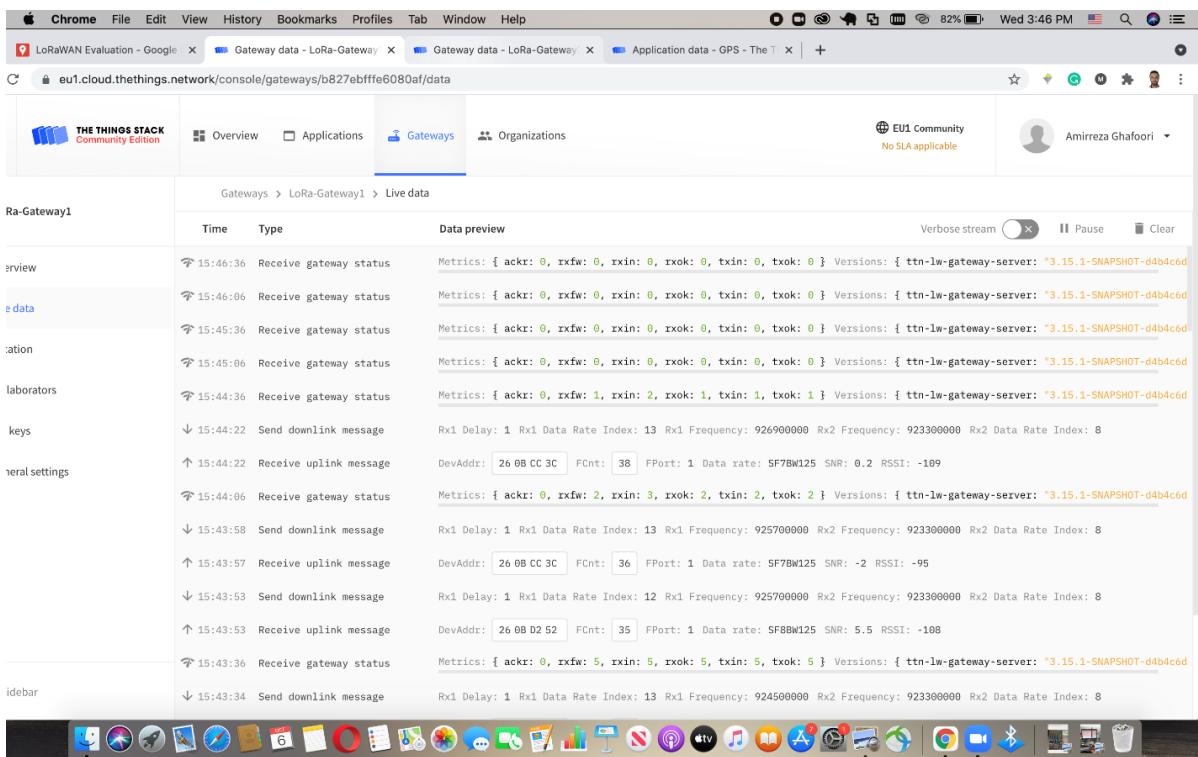
در این بخش به بررسی آزمایش‌های سناریوهای متحرک و نتایجی که از این آزمایش‌ها به دست آوردیم خواهیم پرداخت. ابتدا به جزئیات انجام آزمایش‌های سیناریوهای متحرک می‌پردازیم و سپس تصاویری از انجام آزمایشات و نتایج به دست آمده از آن‌ها ارائه می‌دهیم. برای انجام آزمایش‌های متحرک در محدوده دروازه‌های شماره ۱ و ۳ (بنفس و نارنجی) از دستگاه‌ها انتهايی GPS-1 و GPS-3 استفاده کردیم و برای انجام آزمایش‌های متحرک در محدوده دروازه شماره ۲ (مشکی) از دستگاه انتهايی GPS-5 با آنتن بزرگ استفاده کردیم.

ابتدا به بررسی مسیرهای در نظر گرفته شده برای آزمایش‌های متحرک می‌پردازیم. در شکل ۳۸-۵ مسیرهای انجام آزمایش‌ها برای ارزیابی شبکه در سیناریوهای متحرک را مشاهده کردیم. حال به جزئیات هر مسیر می‌پردازیم. در شکل ۳۸-۵ مسیر اول را مشاهده می‌کنید.



شکل ۳۸-۵ مسیر اول ارزیابی متحرک شبکه

در این مسیر از محل دروازه شماره ۱ (نارنجی رنگ) شروع به حرکت کرده و به سمت دروازه شماره ۳ (بنفش) می‌رویم. با بررسی بسته‌های دریافت شده در سرور کاربرد در طول این مسیر، متوجه می‌شویم که برای بازه‌ای ۱ دقیقه‌ای بسته‌های ارسال شده توسط دستگاه‌های انتهایی در هیچ‌کدام از دروازه‌ها دریافت نمی‌شوند. با این حال در طول مسیر پیوستگی نسبتاً خوبی در دریافت داده‌ها توسط دروازه‌ها وجود داشت. در حقیقت با توجه به این‌که در شبکه LoRaWAN بسته‌ها توسط دستگاه‌های انتهایی ارسال همگانی می‌شوند و نیازی به برقراری اتصال میان دروازه‌ها و دستگاه‌های انتهایی برای رد و بدل کردن داده وجود ندارد، این شبکه برای سیناریوهای متحرک به خوبی پاسخ می‌دهد. در شکل ۳۹-۵ مشاهده می‌کنید که دروازه شماره ۱ (نارنجی) از لحظه ۱۵:۴۴:۲۲ به بعد داده‌ای دریافت نمی‌کند که به معنی خارج شدن از رنج دروازه می‌باشد.



شکل ۳۹-۵ عدم دریافت بسته توسط دروازه شماره ۱ از ۱۵:۴۴:۲۲

همچنین در شکل ۴۰-۵ مشاهده می‌کنید که دروازه شماره ۳ از لحظه ۱۵:۴۵:۳۵ داده دریافت می‌کند. مقایسه این دو عکس نشان می‌دهد که دستگاه انتها ای از دروازه شماره ۱ دور شده و به دروازه شماره ۳ نزدیک می‌شود. در این بین به مدت ۱ دقیقه و ۱۲ ثانیه در برد هیچ‌کدام از این دو دروازه قرار ندارد.

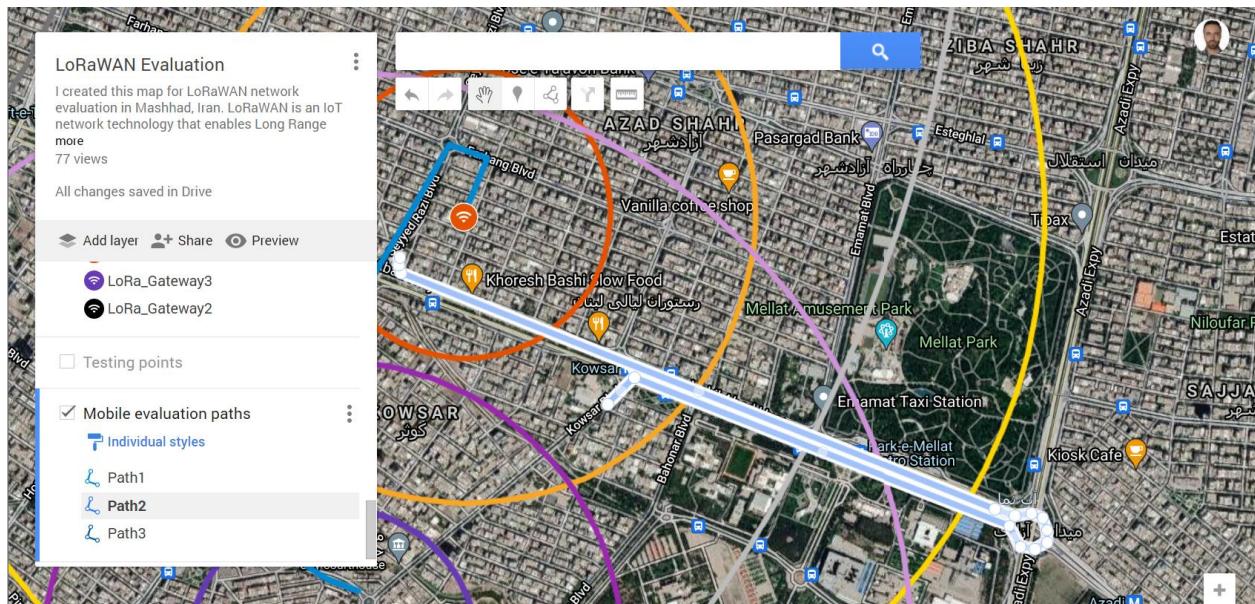
شکل ۴۰-۵ دریافت بسته توسط دروازه شماره ۳ از لحظه ۱۵:۴۵:۲۵

حال در شکل ۴۱-۵ داده‌های دریافت شده در سرور کاربرد در این بازه زمانی را مشاهده می‌کنید.

شکل ۴۱-۵ داده‌های دریافت شده در سرور کاربرد در مسیر ۱

با بررسی این موارد به این نتیجه می‌رسیم که در شبکه LoRaWAN می‌توان به راحتی بحث متحرک بودن دستگاه انتهایی را هندل کرد و اگر برد دروازه‌ها بیشتر باشد و بتواند به خوبی همپوشانی داشته باشند، دریافت داده‌ها در سرور کاربرد بدون ایجاد وقفه انجام خواهد شد.

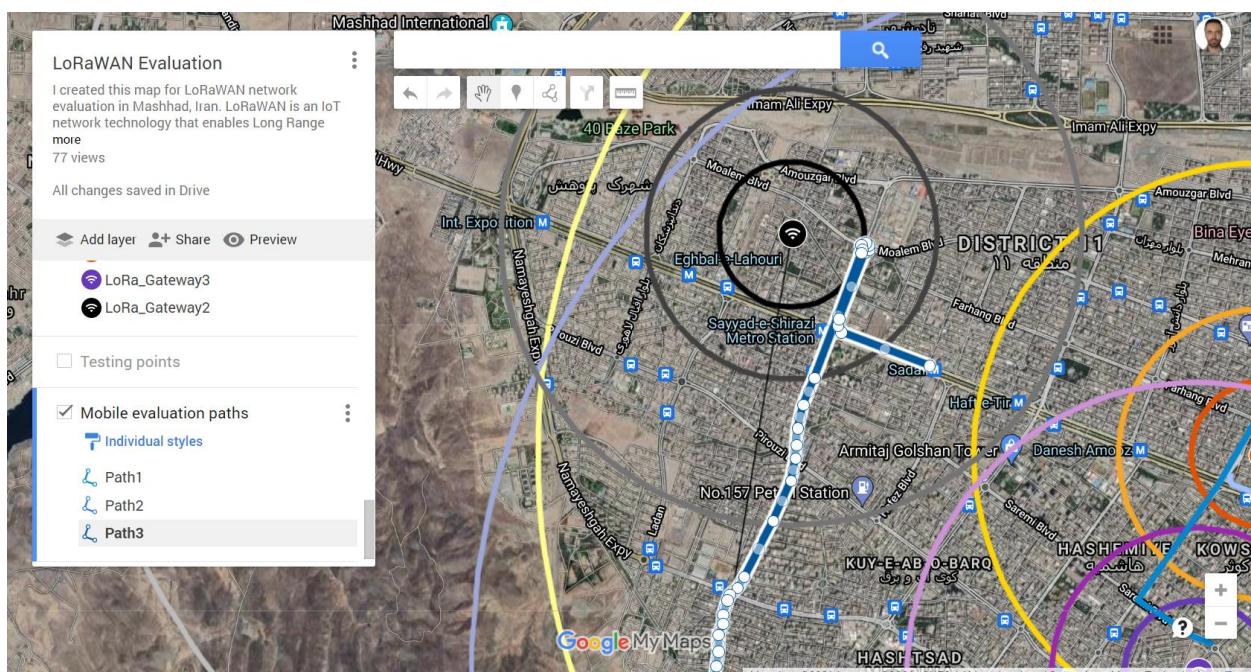
در ادامه به بررسی مسیر دوم می‌پردازیم. در شکل ۴۲-۵ مسیر دوم را مشاهده می‌کنید.



شکل ۴۲-۵ مسیر دوم ارزیابی متحرک شبکه

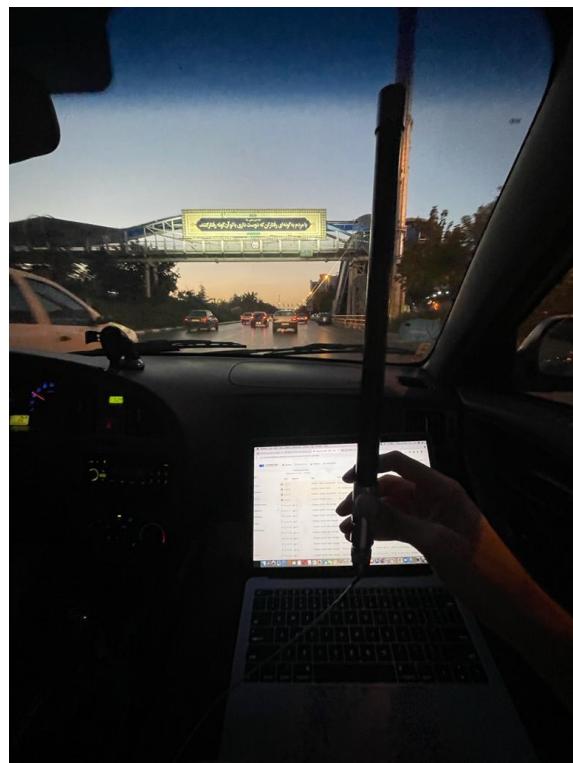
در این مسیر ابتدا به سمت شرق رفته و سپس دور زده و به سمت غرب می‌رویم. در طول این مسیر هیچ داده‌ای از دستگاه‌های انتهایی در دروازه‌ها دریافت نشد و علت این امر را می‌توان به پوشش کم دروازه‌ها به علت ارتفاع کم محل استقرارشان و همچنین موقعیت جغرافیایی آن‌ها بر روی پشت بامها نسبت داد.

مسیر آخری که به بررسی آن می‌پردازیم طولانی ترین مسیر انتخابی می‌باشد. در این مسیر از دستگاه انتهایی ۲ (مشکی) قرار داشتیم. در شکل ۴۳-۵ مسیر سوم قابل مشاهده می‌باشد.

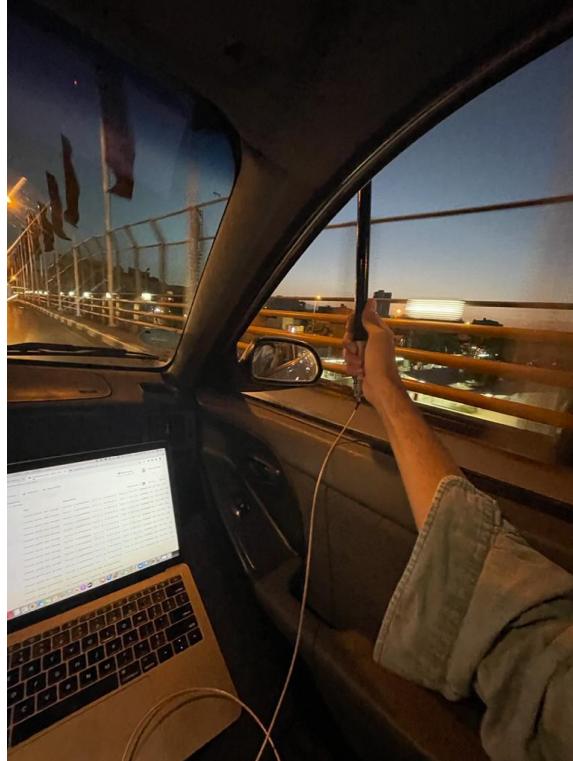


شکل ۴۳-۵ مسیر سوم ارزیابی متحرک شبکه

در این مسیر ابتدا به سمت شرق، سپس به سمت شمال رفته و دور میزnim و به سمت جنوب تا انتهای خیابان صیادشهری (خیابانی که در شکل از شمال تا جنوب مشخص شده است) می‌رویم. در ادامه تصاویری از انجام آزمایش در طول این مسیر را مشاهده می‌کنید.



شکل ۴۴-۵ تصویر مسیر سوم (بلوار وکیل آباد)



شکل ۴۵-۵ تصویر مسیر سوم (پل صیاد شیرازی)

نکته قابل توجه این بود که در کل مسیر طی شده، داده‌های ارسال شده توسط دستگاه انتهایی در دروازه شماره ۲ (مشکی). این مورد را می‌توان به چند علت نسبت داد:

۱. به جای آتن کوچک از آتن بزرگ در دستگاه انتهایی استفاده کردیم
۲. ارتفاع دروازه شماره ۲ نسبت به دو دروازه دیگر بالاتر بود (طبقه نهم)
۳. مسیر حرکت در خط دید دروازه شماره ۲ قرار داشت
۴. به ادامه دادن مسیر به سمت جنوب ارتفاع دستگاه انتهایی نیز افزایش می‌یافتد (به کوه نزدیک می‌شدیم)

حال که آزمایش‌های انجام شده در سناریوهای متحرک را بررسی کردیم و نتایج را به دست آوردهیم، در ادامه به ارزیابی شبکه و تحلیل نتایج خواهیم پرداخت.

۴-۳-۵ نتایج ارزیابی شبکه در سناریوهای متحرک

پس از انجام آزمایش‌ها در سناریوهای متحرک، در این بخش به بررسی و تحلیل نتایج آن‌ها می‌پردازیم. در این سناریوها معیار سنجش به جای فاصله سرعت حرکت دستگاه انتهایی می‌باشد. پارامترهایی چون قدرت سیگنال دریافتی و نسبت سیگنال به نویز علاوه بر سرعت به فاصله دستگاه‌های انتهایی از دروازه نیز بستگی دارند، در نتیجه برای ارزیابی شبکه معیار مناسبی نمی‌باشند. اگر بخواهیم این پارامترها را معیار قرار دهیم باید مسیری دایره شکل به دور دروازه داشته باشیم که از نظر ویژگی‌های مسیر هر نقطه به نقطه دیگر یکسان باشد. سپس با سرعت‌های مختلف این مسیر دایره شکل را طی کنیم و پارامترهای ذکر شده را در سرعت‌های مختلف بسنجیم. اما در این پروژه امکان طی کردن یک مسیر دایره شکل یکتا وجود نداشت، در نتیجه ما این پارامترها را به عنوان معیار ارزیابی قرار نمی‌دهیم. در عوض دو پارامتر دیگر برای ارزیابی تعریف می‌کنیم:

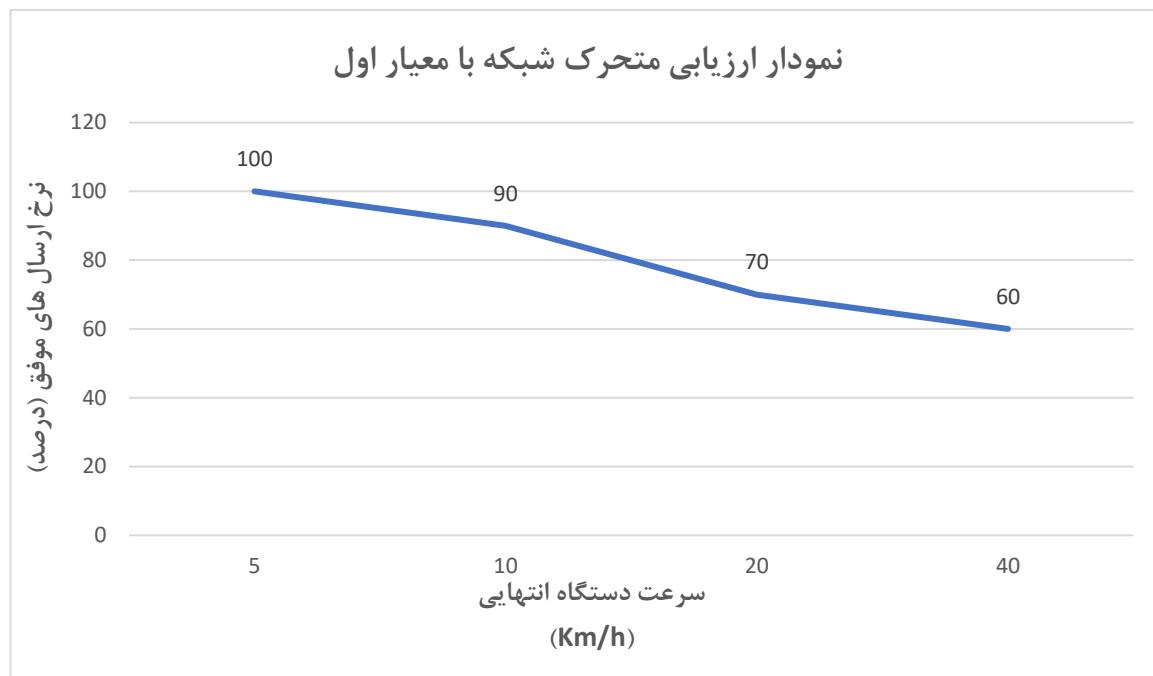
۱. تعداد بسته‌های دریافت شده در هر 10^4 بسته ارسال شده توسط دستگاه انتهایی (RP^1)

¹ Received Packets

۲. نسبت کل بسته‌های دریافت شده (TRP)^۱ به کل بسته‌های ارسال شده (TSP)^۲ در طول کل مسیر

معیار اول را در سرعت‌های مختلف و معیار دوم را در مسیرهای مختلف با یکدیگر مقایسه می‌کنیم. در ادامه نمودار این دو مقایسه را مشاهده خواهید کرد.

شکل ۵-۴۶ نمودار معیار اول (RP در سرعت‌های مختلف) را نشان می‌دهد.



شکل ۵-۴۶ نمودار ارزیابی شبکه بر اساس بسته‌های دریافت شده در حال حرکت

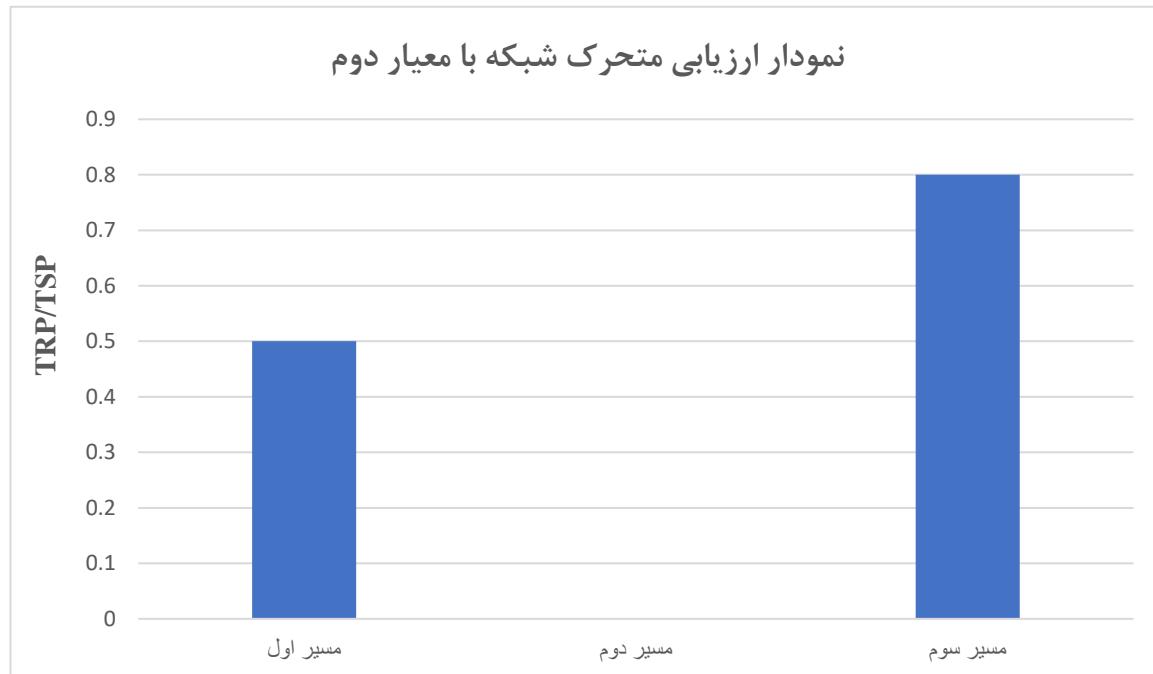
همانطور که انتظار می‌رفت، با افزایش سرعت حرکت دستگاه انتها بی تعداد بسته‌های دریافت شده کاهش می‌یابد، هرچند این کاهش زیاد نبوده و نشان می‌دهد که شبکه LoRaWAN می‌تواند انتخاب خوبی برای ارتباطات اینترنت اشیاء در سناریوهای متحرک باشد.

در ادامه به مقایسه مسیرهای مختلف انتخاب شده (مسیر اول، دوم و سوم) که در بخش قبل توضیح داده شد، از نظر معیار دوم یعنی نسبت تعداد کل بسته‌های دریافت شده در سرور کاربرد به تعداد کل بسته‌های

¹ Total Received Packets

² Total Sent Packets

ارسال شده توسط دستگاه‌های انتهایی می‌پردازیم. برای نمایش این مقایسه از یک نمودار میله‌ای استفاده می‌کنیم. در شکل ۴۷-۵ نمودار ذکر شده را مشاهده می‌کنید.



شکل ۴۷-۵ نمودار ارزیابی شبکه بر اساس نسبت بسته‌های دریافت شده به ارسال شده

۵-۳-۵ ارزیابی انرژی مصرفی شبکه

تا به اینجا شبکه LoRaWAN را در سناریوهای مختلف ثابت و متحرک بررسی و ارزیابی کردیم. در این بخش هدف ارزیابی شبکه از نظر مصرف انرژی می‌باشد. همانطور که پیش‌تر در بخش تنظیم پارامترهای دستگاه‌های انتهایی توضیح دادیم، برای ارزیابی انرژی مصرفی شبکه از دو دستگاه انتهایی-2 gps- و gps-4 استفاده کردیم و پارامترهای این دو دستگاه را طوری تنظیم کردیم که دستگاه gps-2 مصرف بسیار پایین و دستگاه gps-4 بیشترین مصرف انرژی ممکن را داشته باشد. از آنجایی که مازول تعذیه استفاده شده در دستگاه‌های انتهایی طراحی شده مجهز به چراغ نوری LED می‌باشد، انرژی مصرفی اندازه‌گیری شده مربوط به دستگاه انتهایی می‌باشد یعنی هم انرژی مصرفی شبکه LoRaWAN و هم انرژی ای که LED‌ها مصرف می‌کنند. ابتدا بار دیگر پارامترهای تنظیم شده در دستگاه‌های انتهایی را توضیح می‌دهیم:

- دستگاه انتهایی-2 gps: عامل گسترش ۷، پهنه‌ای باند ۱۲۵ کیلوهرتز، توان ارسالی ۷ دسی‌بل و زمان بین ارسال هر دو بسته ۵ ثانیه

- دستگاه انتهایی 4-gps: عامل گسترش ۱۲، پهنای باند ۵۰۰ کیلوهرتز، توان ارسالی ۱۴ دسیبل و زمان بین ارسال هر دو بسته ۵ ثانیه

همانطور که گفته شد، دستگاه انتهایی 2-gps را طوری تنظیم کردیم که انرژی مصرفی آن به حداقل نزدیک شود (توان ارسالی را حداقل نگذاشتیم بلکه نصف دستگاه دوم گذاشتیم بعنی ۷ دسیبل). به عبارت دیگر، عامل گسترش حداقل، پهنای باند حداقل و توان ارسالی نصف مقدار ماکسیمم باعث می‌شود دستگاه نزدیک به حالت بهینه قرار بگیرد. همچنین با تنظیم پارامترهای 4-gps به صورت حداکثری، این دستگاه را در بیشینه^۱ مصرف انرژی قرار می‌دهیم. با این کار می‌توانیم حداقل (تقرباً) و حداکثر انرژی مصرفی شبکه را ارزیابی کنیم. از طرفی زمان ارسال بین هر دو بسته را ۵ ثانیه قرار می‌دهیم. همانطور که در توضیحات شبکه LoRaWAN گفتیم، این شبکه با توجه به اینکه از باندهای فرکانسی بدون مجوز استفاده می‌کند باید از قواعد چرخه وظیفه پیروی کند و این قواعد در بهترین حالت اجازه ۱ درصد استفاده از باند فرکانسی در طول شباهه روز را می‌دهد. با در نظر گرفتن این مورد و با توجه به زمان انتشار^۲ سیگنال‌ها تا رسیدن به مقصد (ToA) تنها زمان محدودی از شباهه روز می‌توان از دستگاه انتهایی داده ارسال کرد. برای محاسبه این مقادیر از سایت ذکر شده در مراجع می‌توان استفاده کرد [20].

برای اینکه سیگنال‌های ارسالی ما از دستگاه‌های انتهایی در طول انجام آزمایش برای دیگران مزاحمتی ایجاد نکند، آتن دستگاه‌های انتهایی را جدا کرده و آن‌ها را در یک جعبه قرار می‌دهیم و آن جعبه را با فویل آلミニومی که تا مقداری خوبی سیگنال‌های بی‌سیم را جذب می‌کند، قرار می‌دهیم. در شکل ۴۸-۵ و ۴۹-۵ می‌توان این دستگاه‌ها را مشاهده کرد.

¹ Maximum

² Propagation



شکل ۴۸-۵ دستگاه‌های انتهایی برای اندازه‌گیری انرژی مصرفی



شکل ۴۹-۵ پوشاندن دستگاه‌های انتهایی با فویل آلومینیومی

برای انجام این آزمایش، باتری دو دستگاه را کامل شارژ می‌کنیم. هر دو دستگاه انتهایی از یک باتری لیتیم-پلیمر با ظرفیت ۱۰۰۰ میلی آمپر ساعت با امکان شارژ مجدد استفاده می‌کنند. سپس دستگاهها را روشن کرده و می‌گذاریم تا زمان اتمام شارژ باتری روشن بمانند. در نهایت با استفاده از مدت زمان روشن ماندن هر دستگاه، انرژی مصرفی آن را با توجه به ظرفیت باتری‌ها اندازه‌گیری می‌کنیم. دستگاه انتهایی gps-2 برای مدت ۹۰ ساعت و دستگاه انتهایی gps-4 برای مدت ۶۵ ساعت روشن ماند. با توجه به اینکه هر دستگاه در هر ۵ ثانیه یک بسته ارسال می‌کند، دستگاه انتهایی gps-2 در این مدت تعداد ۶۴۸۰۰ بسته و دستگاه انتهایی gps-4 تعداد ۴۶۸۰۰ بسته ارسال کردند. از آنجایی که ماژول تغذیه خود دارای یک LED قرمز می‌باشد و همچنین ارسال هر بسته LED آبی روی ماژول را به مدت ۲ ثانیه روشن می‌کند، انرژی مصرفی خالص شبکه LoRaWAN کمتر از مقدار اندازه‌گیری شده خواهد بود. در این پروژه برای تخمین انرژی و طول عمر دستگاه‌های انتهایی به مقادیر اندازه‌گیری شده بسته می‌کنیم. همچنین لازم به ذکر است این تعداد بسته با توجه به محدودیت‌های چرخه وظیفه مجاز نمی‌باشد. در حقیقت دستگاه‌های gps-2 می‌توانند حداکثر ۴۰۰ بسته در شبانه روز و دستگاه gps-4 حداکثر ۸۰ بسته در شبانه روز ارسال کند [20]. در نتیجه در صورتی که از محدودیت‌ها پیروی کنیم، با یک باتری لیتیم-پلیمر ۱۰۰۰ میلی آمپر ساعتی می‌توان دستگاه gps-2 را به مدت ۴۳ روز و دستگاه gps-4 را به مدت ۲۱۵ روز روشن نگه داشت. تعداد بسته‌های ارسالی از طرف دستگاه انتهایی در اکثر کاربردهای دنیای واقعی بین ۵ تا ۳۰ بسته در طول روز می‌باشد. اگر فرض را بر این بگیریم که دستگاه انتهایی تنها برای ارسال پیام روشن بشود (دستگاه انتهایی کلاس A) و در بقیه موقع در حالت خواب قرار بگیرد، طول عمر دستگاه انتهایی به میزان قابل توجهی افزایش خواهد یافت. در جدول ۵-۵ عمر دستگاه انتهایی با فرضیات ذکر شده محاسبه شده است.

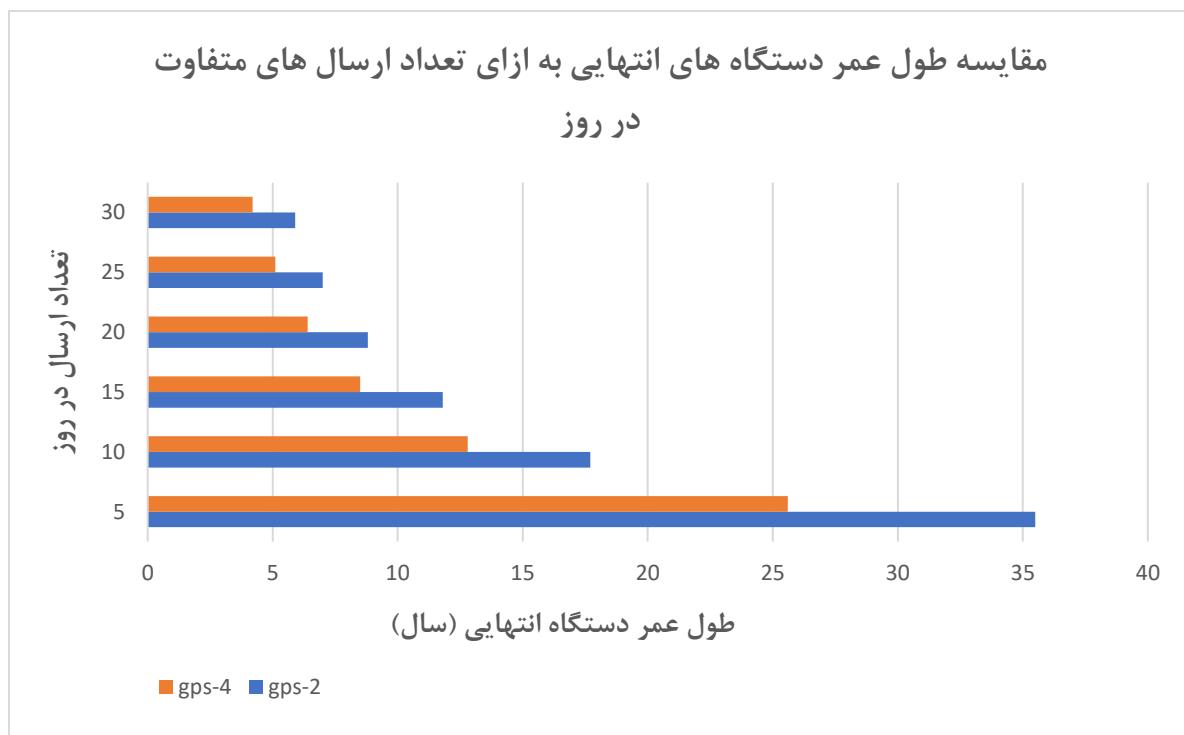
جدول ۵-۵ طول عمر دستگاه‌های انتهاهای کلاس A به ازای تعداد ارسال‌های مختلف در روز به باقی

۱۰۰۰ میلی آمپر ساعتی

تعداد ارسال در روز	۵	۱۰	۱۵	۲۰	۲۵	۳۰
طول عمر gps-2 (سال)	۳۵.۵	۱۷.۷	۱۱.۸	۸.۸	۷	۵.۹
طول عمر gps-4 (سال)	۲۵.۶	۱۲.۸	۸.۵	۶.۴	۵.۱	۴.۲

از جدول بالا می‌توان نتیجه گرفت اگر دستگاه‌های انتهاهای در طول روز ۲۰ بسته ارسال کنند و توان مصرفی آن‌ها در حالت میانگین باشد (متوسط gps-2 و gps-4)، طول عمر دستگاه انتهاهای تقریباً برابر با ۸ سال خواهد بود (میانگین طول عمر gps-2 و gps-4).

در نمودار شکل ۵-۵ نیز مقایسه طول عمر این دو دستگاه به ازای تعداد ارسال‌های مختلف در طول روز مشاهده می‌کنید.



شکل ۵-۵ مقایسه طول عمر دستگاه های انتهایی به ازای تعداد ارسال های متفاوت در روز

جمع بندی

در این فصل به ارزیابی شبکه LoRaWAN با استفاده از زیرساخت شبکه ساخته شده در این پروژه پرداختیم. در ابتدا سenariosیوهای ثابت و متحرکی را برای ارزیابی شبکه تعریف کردیم و سپس به انجام آزمایش و جمع‌آوری نتایج پرداختیم. با توجه به نتایج به دست آمده و تحلیل آن‌ها می‌توان نتیجه گرفت که شبکه LoRaWAN یک شبکه با مصرف انرژی بسیار پایین می‌باشد که هم می‌توان در دستگاه‌های انتهایی ثابت و هم متحرک از آن استفاده کرد. همچنین برد این شبکه در صورت استفاده از تجهیزات مناسب مانند آنتن با گیرایی بالا و استقرار دروازه‌ها در ارتفاع بالا و دکلهای مخابراتی به طوری که خط دید خوبی داشته باشند، بسیار زیاد خواهد بود. از این رو می‌توان یک محدوده بسیار وسیع را با استفاده از تعداد کمی دستگاه انتهایی LoRaWAN پوشش بدھیم.

فصل ششم

جمع‌بندی، نتیجه‌گیری و پیشنهادات

جمع‌بندی، نتیجه‌گیری و پیشنهادات

در این فصل به جمع‌بندی مفاهیم و موارد گفته شده در این پایان‌نامه می‌پردازیم و نتیجه این پژوهش را بررسی می‌کنیم. سپس به چند نمونه از کارهایی که می‌توان در آینده انجام داد و بهبودهایی که می‌توانیم در کار ایجاد کنیم اشاره خواهیم کرد.

۱-۶ جمع‌بندی و نتیجه‌گیری

در این پایان‌نامه ابتدا مفاهیم اینترنت اشیاء و ساختار یک سیستم مبتنی بر اینترنت اشیاء توضیح داده شده‌است. یک سیستم مبتنی به اینترنت اشیاء از اجزاء و لایه‌های مختلفی تشکیل شده است و یکی از آن اجزاء که نقش اساسی در برقراری ارتباطات سیستم اینترنت اشیاء دارد، فناوری شبکه می‌باشد. در ادامه فناوری‌های مختلف شبکه و یک دسته خاص از آن‌ها به نام LPWAN‌ها که مختص کاربردهای اینترنت اشیاء هستند بررسی گردید. از بین شبکه‌های LPWAN فناوری شبکه LoRaWAN به دلیل متن-باز بودن، هزینه پایین پیاده‌سازی آن و وجود جامعه مناسبی برای پشتیبانی از آن به عنوان فناوری شبکه مطلوب انتخاب گردید. در فصل سوم به آشنایی بیشتر با شبکه LoRaWAN و بررسی دقیق‌تر اجزاء آن پرداخته شد. یک شبکه مبتنی بر LoRa از ۴ جزء اصلی شامل دستگاه انتهایی، دروازه، سرور کاربرد و سرور شبکه تشکیل شده است. در فصل چهارم با توجه به دانشی که از شبکه LoRaWAN به دست آمد، به پیاده‌سازی یک زیرساخت برای این شبکه پرداخته شد. در این فصل به تفصیل نحوه ساخت و پیاده‌سازی هر قسمت از معماری شبکه LoRaWAN مورد بررسی قرار گرفت. در فصل پنجم با استفاده از زیرساختی که برای شبکه LoRaWAN ساخته شد، این شبکه مورد ارزیابی قرار گرفت. برای ارزیابی، معیارهایی چون نرخ بسته‌های دریافتی، قدرت سیگنال‌های دریافتی، نسبت سیگنال به نویز در سیگنال‌های دریافتی و انرژی مصرفی شبکه در نظر گرفته شد. همچنین شبکه در سناریوهای ثابت و متحرک ارزیابی گردید.

پس از ارزیابی‌های انجام شده، مشخص گردید که شبکه LoRaWAN می‌تواند در صورت استفاده از تجهیزات خوب مانند آنتن قوی و استقرار درست آن‌ها در محیط، مساحت بسیار وسیعی را پوشش دهد. به عبارتی می‌توان با استفاده از تعداد کمی دروازه (در حدود ۱۰ تا ۲۰) پوششی در حد یک شهر برای

این شبکه ایجاد کرد. همچنین نتایج به دست آمده نشان داد که این شبکه هم در سناریوهای ثابت و هم در سناریوهای متحرک دارای عملکرد مناسبی می‌باشد. در نتیجه می‌توان از آن هم در کاربردهای ثابت مانند کنتور هوشمند و هم در کاربردهای متحرک مانند حمل و نقل هوشمند استفاده نمود. همچنین ارزیابی انرژی مصرفی این شبکه نشان داد که مصرف انرژی آن بسیار پایین بوده و می‌توان دستگاهها انتهایی را در نقاط دور برای مدت طولانی استفاده نمود.

۲-۶ پیشنهادات

در ادامه پیشنهاداتی را جهت بهبود عملکرد شبکه LoRaWAN در طراحی و پیاده‌سازی شبکه، اعم از نکات سخت افزاری و نرم افزاری ارائه خواهیم داد.

- در پیاده‌سازی دستگاه‌های انتهایی می‌توان جهت کاهش هزینه‌ها و همچنین کاهش انرژی مصرفی دستگاه‌های انتهایی، به جای استفاده از بردۀای آماده در بازار مانند بردۀای Arduino به طراحی و پیاده‌سازی برد دلخواه به استفاده از پردازنده در لخواه متناسب با کاربرد مورد نظر پرداخت.
- می‌توان برای بالابردن استقامت دستگاه‌های انتهایی برای آن‌ها متناسب با کاربرد مورد نظر قالب‌های طراحی کرد که از آسیب دیدن دستگاه‌های انتهایی جلوگیری کرده و طول عمر آن‌ها را افزایش دهد.
- می‌توان به منظور افزایش سطح پوشش دروازه‌های شبکه LoRaWAN آن‌ها را در پشت بام ساختمان‌های بسیار مرتفع و روی دکل‌های مخابراتی قرار داد. با این کار خط دید دروازه‌ها بهتر شده و در نتیجه می‌توانند مساحت بزرگتری را پوشش دهند.
- به جای استفاده از آنتن‌های متوسط (که در این پروژه استفاده شد) می‌توان برای دروازه‌ها آنتن‌های بسیار بزرگ با گیرایی بسیار بیشتر طراحی کرد، که این امر موجب افزایش قابل توجه برد شبکه و پوشش دروازه‌ها می‌شود.
- در این پروژه ما از یک پلتفرم عمومی و بدون هزینه استفاده کردیم. می‌توان برای بهبود کیفیت سرویس و جمع‌آوری و تحلیل بدههای دریافتی در سرور شبکه و سرور کاربرد، به طراحی و پیاده‌سازی پلتفرم شبکه LoRaWAN پرداخت. با توجه به این که این فناوری یک فناوری متن‌باز می‌باشد، امکان ساخت و توسعه یک پلتفرم بومی برای آن وجود دارد. همچنین با انجام این کار امنیت سیستم از نظر حفاظت از داده‌های جمع‌آوری شده افزایش می‌یابد.

- در این پژوهه ما برای راهاندازی دستگاه‌های انتهایی از روش ABP استفاده کردیم. این کار را برای افزایش سرعت راهاندازی دستگاه‌ها برای ارزیابی‌ها انجام دادیم. در پیاده‌سازی کاربردهای واقعی می‌توان از روش OTAA استفاده کرد که دارای امنیت بیشتری است می‌باشد.
- در این پژوهه مقادیر عامل گسترش، توان ارسالی و پهنتای باند را به صورت کدساخت در دستگاه‌ها تنظیم کردیم. این کار باعث کاهش کارایی سیستم می‌شود زیرا دستگاه‌های انتهایی بدون توجه به شرایط محیطی و فاصلشان از دروازه‌ها انرژی ثابتی را مصرف می‌کنند. برای بهبود این قضیه می‌توانیم از الگوریتم نرخ داده انطباقی و روش نوین نرخ داده انطباقی پویا [سایت به جابر] استفاده کنیم.
- با استفاده از زیرساخت ساخته شده برای شبکه LoRaWAN و فراهم کردن زیرساخت‌های مشابه می‌توان از کاربردهای ویژه شبکه مانند مکان‌یابی با استفاده از شبکه LoRaWAN بهره مند شد.

منابع و مراجع

- [1] F. R. a. O. Boissier, "Smart devices embedding multi-agent technologies for a pro-active world," *Ubiquitous Comput. Work*, 2002.
- [2] "Towards a definition of the Internet of Things (IoT)," [Online]. Available: https://www.researchgate.net/publication/317588072_Towards_a_definition_of_the_Internet_of_Things_IoT. [Accessed 17 sep 2020].
- [3] M. Pégulu, "Three Ways to Get Started With LoRa®," blog.semtech.cn, 19 March 2021. [Online]. Available: <https://blog.semtech.cn/three-ways-to-get-started-with-lora>.
- [4] M. Bor and U. Roedig, "Selection, LoRa Transmission Parameter," in International Conference on Distributed Computing in Sensor Systems (DCOSS), Ottawa, ON, Canada, 2017.
- [5] M. J. Abbas, M. Awais and A. U. Haq, "Comparative Analysis of Wideband Communication Techniques: Chirp Spread Spectrum and Direct Sequence Spread Spectrum," in *International Conference on Computing, Mathematics and Engineering Technologies iCoMET*, 2018.
- [6] L. Slats, "A Brief History of LoRa®: Three Inventors Share Their Personal Story at The Things Conference," blog.semtech.cn, 08 January 2020. [Online]. Available: <https://blog.semtech.com/a-brief-history-of-lora-three-inventors-share-their-personal-story-at-the-things-conference>.
- [7] *RAK831 LoRa Concentrator module.* Retrieved from <https://www.rakwireless.com/en-us/products/lpwlan-gateways-and-concentrators/rak831>

- [8] W. Ayoub, A. E. Samhat, F. Nouvel, M. Mroue and J.-C. Prévotet, "Internet of Mobile Things: Overview of LoRaWAN, DASH7, and NB-IoT in LPWANs Standards and Supported Mobility," *IEEE Communications Surveys & Tutorials*, vol. 21, no. 2, pp. 1561 - 1581, 23 October 2018.
- [9] M. J. Abbas, M. Awais and A. U. Haq, "Comparative Analysis of Wideband Communication Techniques: Chirp Spread Spectrum and Direct Sequence Spread Spectrum," in *International Conference on Computing, Mathematics and Engineering Technologies iCoMET*, 2018.
- [10] X. Liu, Z. Wu and W. Ben, "Experimental analysis and modeling of CSS ranging in LOS and NLOS environments," in *2013 22nd Wireless and Optical Communication Conference*, Chongqing, China , 2013.
- [11] "LoRaWAN," mobilefish, [Online]. Available: https://www.mobilefish.com/developer/lorawan/lorawan_quickguide_tutorial.html.
- [12] "LoRaWAN specification (V1.1)," *LoRa Alliance*, 2017.
- [13] Casas, G. *LoRaWAN Multi-channel Gateway*. Retrieved from Github: <https://github.com/ttn-zh/ic880a-gateway>
- [14] *LoRa and LoRaWAN: A technical overview*. Retrieved from Semtech: <https://lora-developers.semtech.com/documentation/tech-papers-and-guides/lora-and-lorawan>
- [15] Telkamp, T. *Single Channel Packet Forwarder*. Retrieved from Github: https://github.com/tftelkamp/single_chan_pkt_fwd

- [16] Pham,C. Retrieved from Github:
<https://github.com/CongducPham/LowCostLoRaGw/tree/master/PCBs>
- [17] A. J. B. N. P. M. a. S. K. R. S. Ramnath, "IoT based localization and tracking," in 2017 International Conference on IoT and Application (ICIOT), 2017.
- [18] T. Bouguera, J.-F. Diouris, J.-J. Chaillout, R. Jaouadi and G. Andrieux, "Energy Consumption Model for Sensor Nodes Based on LoRa and LoRaWAN," *sensors*, pp. 1-23, 30 June 2018.
- [19] *LoRaWAN Regional Parameters*. Retrieved from LoRa Alliance:
<https://lora-alliance.org/resource-hub/rp002-100-lorawanr-regional-parameters>
- [20] Van Betntem, A. *Airtime Calculator for LoRaWAN*. Retrieved from Github:
<https://avbentem.github.io/airtime-calculator/ttn/us915>
- [21] *IoT Architecture*. Retrieved from Netburner:
<https://www.netburner.com/learn/architectural-frameworks-in-the-iot-civilization/>
- [22] Cisco. *Building the internet of things*. Retrieved from Cisco:
https://www.cisco.com/c/dam/global/en_ph/assets/ciscoconnect/pdf/bigdata/jim_green_cisco_connect.pdf
- [23] *IoT Architecture Layers*. (n.d.). Retrieved from hIoTron:
<https://www.hiotron.com/iot-architecture-layers/>

- [24] Hanes, D., Salgueiro, G., Grossete, P., Barton, R., & Henry, J. (2017). *IoT Fundamentals: Networking Technologies, Protocols, and Use Cases for the Internet of Things*. Cisco Press.
- [25] *AI Smart agriculture control Device*. (n.d.). Retrieved from Hackaday: <https://hackaday.io/project/166413-ai-smart-agriculture-control-device>
- [26] Medina, C., Perez Cerquera, M. R., & Trujillo Arboleda, L. C. (2017). IoT Paradigm into the Smart City Vision: A Survey. *IEEE International Conference on Internet of Things (iThings) and IEEE Green Computing and Communications (GreenCom)*.
- [27] ANALYTICS, I. (2015). *IoT Platforms: The central backbone for the Internet of Things*.
- [28] Santa, J., Sanchez-Iborra, R., Rodriguez-Rey, P., Bernal-Escobedo, L., & Skarmeta, A. F. (2019). LPWAN-Based Vehicular Monitoring Platform with a Generic IP Network Interface. *Sensors*.
- [29] Pecoraro, A. (2017). *Introduction to LoRa*. Linux Embedded.
- [30] *Guide to reduce the Arduino Power Consumption*. Retrieved from DiyIot: <https://diyi0t.com/arduino-reduce-power-consumption/>
- [31] Raj, A. *LoRa with Raspberry Pi - Peer to Peer Communication with Arduino*. Retrieved from circuitdigest: <https://circuitdigest.com/microcontroller-projects/raspberry-pi-with-lora-peer-to->

Abstract

LoRaWAN network technology is one of the Low Power Wide Area Network (LPWAN) technologies with a high range and low energy consumption. This technology consists of 4 main parts, including LoRa based end-device, gateway, network server, and application server. In this project, an infrastructure for the LoRaWAN network is designed and implemented and then evaluated. To implement this infrastructure, first, five end-devices were designed and built using a LoRa RF96 radio module and Arduino pro mini on a PCB and a 1000 mAh rechargeable battery. The three gateways are then prepared and configured using the RAK831 8-channel transceiver on 3 Raspberry pi minicomputers. Finally, the TTN platform is used for the network server and application server. Then, for evaluating the network, two general scenarios are designed, including mobile scenarios and stationary scenarios, and are displayed on Google Map by specifying the location of the gateways. In the scenarios, positions in the range of 0.5, 1, 2, and 5 km from the gateways are considered for conducting stationary tests and, three different paths are considered for conducting mobile tests. To evaluate criteria such as packet delivery ratio, the strength of incoming signals, and the signal-to-noise ratio at different distances for stationary scenarios and at different speeds for mobile scenarios. The results showed that the LoRaWAN network has a successful transmission rate of 90% at distances below 2 km and 60% at distances between 2 to 3 km (up to a distance of 3.1 km was measured for the successful transmission of data). Successful delivery rates for speeds from 10 to 40 km were also varied from 100% to 60%. Finally, the evaluation of the network energy consumption showed that the average life (battery) of a Class A end-device is 8 years.

Key Words: LoRaWAN network, LoRaWAN implementation, LoRaWAN evaluation, successful transmission, energy consumption



**Amirkabir University of Technology
(Tehran Polytechnic)**

Department of Computer Engineering

BSc Thesis

**Implementation of LoRaWAN communication
technology and evaluation of its energy consumption
and data rate in an urban environment**

**By
Amirreza Ghafoori**

**Supervisor
Dr. Mehdi Rasti**

September 2021