

تخمین پارامترهای موثر بر بهبود پوشش‌دهی شبکه LORA در کاربردهای اینترنت اشیا

الهام باقری، مژده مهدوی*، محسن معدنی

گروه الکترونیک، واحد شهر قدس، دانشگاه آزاد اسلامی، تهران، ایران. *m.mahdavi@qodsiu.ac.ir

چکیده

اینترنت اشیا بخش مهمی از زیرساخت تحقق شهر هوشمند است و پوشش‌دهی در شبکه اینترنت اشیا نقش بسیار اساسی در عملکرد آن ایفا می‌کند. پارامترهای مختلفی از جمله پهنای باند، توان ارسالی، نویز و شرایط محیطی در پوشش‌دهی شبکه اینترنت اشیا و میزان دریافت بسته‌های ارسالی موثر است. شبکه لورا (LoRaWAN) یکی از پروتکل‌های اصلی دوربرد توان پایین، ویژه اینترنت اشیا است. پیاده‌سازی زیرساخت و ارائه راه‌حل‌های اینترنت اشیا مبتنی بر فناوری لورا، پوشش‌دهی استفاده از اینترنت اشیا و بهبود زیرساخت‌های ارتباطی از جمله توانمندی‌های نوین قابل ارائه در این حوزه است. هدف از این مقاله توصیف پارامترهای مورد نیاز برای بهبود عملکرد و افزایش پوشش‌دهی شبکه لورا است، برای این منظور در محیط مختلف نویزی، پارامترهای مختلف مانند پهنای باند و فاکتور گسترش، بررسی شده و تأثیر نویز به پوشش‌دهی و نرخ بیت به دست آمده است. در نهایت یک برنامه کاربردی مبتنی بر پارامترهای موردنظر اجرا شده و روشی کم‌هزینه، با پوشش زیاد و نرخ داده ثابت برای هوشمندسازی یک پارکینگ در شهر تهران بیان و شبیه‌سازی شده است.

کلیدواژه

شبکه لورا، اینترنت اشیا، خانه هوشمند، پوشش‌دهی شبکه

مقدمه

کارهای متعددی بر محور این فناوری راه‌اندازی شده‌اند. انتقال صوت رادیویی که با عنوان "تلگراف بی سیم" نامیده شد برای اولین بار در ۳ ژوئن سال ۱۹۰۰ راه‌اندازی شد و یکی از پایه‌های اصلی IoT را فراهم کرد [۲]. در اوایل ۱۹۸۰، اولین دستگاه اینترنتی، یک ماشین نگهداری و تحویل نوشابه در دانشگاه "کارنگی ملون" بود. برنامه نویسان توانستند که از طریق اینترنت به این ماشین متصل شده و وضعیت آن را بررسی نمایند و از راه دور آن را مدیریت کرده و به مشتری سرویس‌دهی کنند [۳]. سپس در مقیاس کاربردی این سیستم برای نخستین بار در سال ۱۹۹۹ توسط "کوین اشتون" مورد استفاده قرار گرفت و جهانی را توصیف کرد که در آن هر چیزی، از جمله اشیا بی‌جان، برای خود هویت دیجیتال داشته باشند و به کامپیوترها اجازه دهند که آنها را سازماندهی و مدیریت کنند. اینترنت، در حال حاضر همه مردم را به هم متصل می‌کند ولی با اینترنت اشیا تمام اشیا به هم متصل می‌شوند. البته پیش از آن، "کوین" در کتاب قوانین نوین اقتصادی در عصر شبکه، موضوع گره‌های کوچک هوشمند که به شبکه جهانی اینترنت وصل می‌باشند را مطرح نمود. در سال ۲۰۰۰، شرکت LG به عنوان یک پرش بزرگ در تجاری‌سازی

اینترنت اشیا^۱، فناوری جدیدی است که بمنظور اتصال تمامی اشیا به یکدیگر از طریق اینترنت و با هدف سنجش و کنترل از راه دور استفاده می‌گردد. هم‌اینک به کمک فناوری اینترنت اشیا، امکان اتصال هر شیء به شبکه فراهم شده است. اینترنت اشیا شبکه‌ای را جهت اتصال افراد، اشیا، برنامه‌ها و اطلاعات از طریق اینترنت برای مواردی همچون کنترل از راه دور، مدیریت و سرویس‌های یکپارچه تعاملی فراهم می‌نماید [۱]. سیستم اینترنت اشیا دارای مجموعه‌ای از دستگاه‌های هوشمند مبتنی بر وب است که با بهره‌گیری از پردازنده‌های جاسازی‌شده، سنسورها و سخت‌افزار ارتباطی، به گردآوری اطلاعات، ارسال و تحلیل داده‌های دریافت‌شده از محیط می‌پردازد. اینترنت اشیا فرصت‌هایی را برای ادغام مستقیم دنیای فیزیکی و سیستم‌های مبتنی بر تجهیزات هوشمند ایجاد می‌کند. داده‌های گردآوری‌شده توسط حسگرها از طریق اتصال به یک درگاه IoT و یا به‌صورت محلی تحلیل می‌شوند [۱]. این شبکه به سرعت در حال رشد و توسعه است و کسب و

^۱ Internet of Things (IoT)

سازوکارهای دیگری این ارتباط را برقرار کرد. پس از استقبال کم از این دو روش ارتباطی، ZigBee و LoWPAN مطرح شدند [۶]. این دو پروتکل نیز نقاط قوت و ضعف‌هایی داشتند. سبک بودن و مصرف کم توان از محاسن آن‌ها به شمار می‌آیند، اما برد کم و هزینه سنگین تهیه لوازم مربوطه، از جمله معایب آن‌ها است. در این حین، گروهی از محققان به فکر ایجاد پروتکلی با امنیت مناسب، برد بالا، مصرف کم توان و مناسب برای اینترنت اشیا افتادند. آن‌ها در نظر داشتند پروتکل جدید از خانواده LPWAN^۲ باشد [۵-۷].

شبکه لورا (LoRaWAN^۳) یکی از پروتکل‌های اصلی دوربرد توان پایین ویژه اینترنت اشیا است. این فناوری به سیگنال‌ها اجازه می‌دهد تا حتی در سطوح پایین‌تر از نویز نیز منتشر و بازیابی شوند. تجهیزات مبتنی بر LoRaWAN می‌توانند تا سال‌ها فقط با یک باتری کار کنند. مهمترین مشخصه شبکه LoRaWAN که توانسته است در کنار مزیت‌های فنی این پروتکل زمینه رشد سریع آن را فراهم کند، رویکرد غیر انحصاری توسعه این پروتکل بر بستر یک جامعه آزاد و با مشارکت مجموعه‌های مختلف فناوری است. فناوری‌های شبکه به‌طور گسترده به‌صورت باسیم و بیسیم طبقه‌بندی شده‌اند. این شبکه دارای پوشش دهی بالا (برد بلند) در مناطق روستایی (بین ده تا پانزده کیلومتر) و در مناطق شهری بین دو تا پنج کیلومتر است. در این شبکه باندهای فرکانسی بدون نیاز به مجوز می‌توانند محدوده وسیعی را با توان مصرفی پایین، تحت پوشش قرار دهند [۷]. مشخصات LoRaWAN از یک منطقه به منطقه دیگر براساس تخصیص طیف متفاوت منطقه‌ای و نیازمندی‌های تنظیم و مقررات، کمی متفاوت است [۷]. بیشتر مشخصات LoRaWAN برای اروپا و آمریکای شمالی تعریف شده‌اند و از راه حل‌ها و استانداردهایی که برای این دو قاره تهیه شده، می‌توان برای آسیا نیز استفاده کرد [۸]. در حال حاضر بیش از ۶۰۰ مورد استفاده صنعتی و کاربردی از فناوری اینترنت اشیا مورد تأیید قرار گرفته است، مثلاً از شبکه LoRaWAN در سال ۲۰۱۶ برای کنترل بی سیم حسگرهای استفاده شده در صنعت و یا ساختمان به کار گرفته شده است. با استفاده از سیستم اینترنت اشیا به نرخ نمونه‌برداری بالایی بین ۳۰۰ بیت بر ثانیه تا ۵۰ کیلو بیت بر ثانیه به کمک شبکه LoRaWAN حاصل شده است [۸]. برای افزایش سرعت انتقال اطلاعات، سیستم اینترنت اشیا شبکه LoRaWAN با شبکه‌های نسل ۴ و نسل ۵ ادغام شده‌اند [۹]. اخیراً سیستم اینترنت اشیا مبتنی بر شبکه LoRaWAN در یک سیستم نظارت بر کیفیت آب استفاده شده است. این

IoT گام برداشت و از یخچال هوشمندی رونمایی نمود که قادر بود تشخیص دهد چه زمانی، کدام مواد غذایی به اتمام رسیده و آن را از طریق اینترنت به اطلاع کاربر می‌رساند [۴]. بعدها در سال ۲۰۱۰ نیز شرکت Haier، ساخت نخستین یخچال IoT را اعلام کرد. تا سال ۲۰۱۳، اینترنت اشیا با استفاده از فناوری‌های متعددی چون ارتباطات بی‌سیم، سیستم‌های میکروالکترومکانیکی (MEMS) و سیستم‌های تعبیه‌شده، تحول زیادی یافت [۴]. زمینه‌های اتوماسیون (شامل اتوماسیون ساختمان‌ها و خانه‌ها)، شبکه‌های حسگر بی‌سیم، GPS، سیستم‌های کنترلی و موارد دیگر منجر به تحول بیشتر IoT گشت. همچنین، IoT در تشخیص آتش‌سوزی جنگل‌ها، پایش گازهای حاصل از احتراق و تغییرات ناگهانی دما، جهت اتخاذ اقدامات پیشگیرانه بخصوص در مناطق دارای سیستم هشدار آتش‌سوزی نیز کاربردهای گسترده‌ای یافته است [۴-۶].

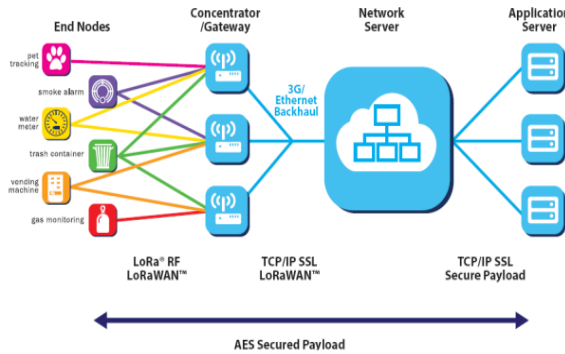
هم اکنون، استفاده از این فناوری برای کارآفرینان و محققین، یک فرصت گران‌بها به شمار می‌رود که می‌تواند به بهبود فضای کسب و کار و همچنین اشتغال‌زایی در کشور کمک شایانی کند. در این مقاله هدف ما بررسی پوشش دهی شبکه لورا برای دستیابی به شهر هوشمند می‌باشد. نتیجه این تحقیق منجر به کاهش ترافیک شهری، کاهش آلودگی و کاهش مصرف انرژی خواهد شد. برای این منظور به بررسی پارامترهای مهم برای افزایش سطح پوشش دروازه‌راه و تأثیر ارتفاع و نویز محیط بر پوشش و نرخ داده ارسالی می‌پردازیم. در این راستا، ارائه یک ایده کاربردی برای بهبود در هوشمندسازی پارکینگ مدنظر بوده که شبیه سازی آن نیز اجرا شده است. در ادامه و در بخش‌های بعدی به بررسی شبکه لورا و بهبود پروتکل اینترنت اشیا می‌پردازیم. سپس پارامترهای اساسی پوشش‌دهی را بررسی می‌نماییم. پس از آن به کمک پارامترها به شبیه‌سازی یک مثال کاربردی پرداخته و نتایج حاصل از آن را تحلیل می‌نماییم.

LoraWAN و بهبود پروتکل اینترنت اشیا

از زمان آغاز اینترنت اشیا، بحث‌های زیادی درباره عملکرد نامناسب پروتکل‌های ارتباطی موجود برای برقراری ارتباط بین دستگاه‌های مختلف مطرح بود. در مقایسه با ظرفیت منبع انرژی سنسورها، انرژی زیادی مصرف می‌کند، برد آن کم و پهنای باندش زیاد است که اغلب از این پهنای باند به‌طور کامل استفاده نمی‌شود و هدر می‌رود. بلوتوث امنیت کمی دارد، نرخ ارسال و مصرف انرژی آن مناسب، اما برد آن کم است. علاوه بر این، به دلیل ضعف در آدرس‌دهی، ایجاد شبکه‌های بزرگ متصل به یکدیگر با بلوتوث امکان‌پذیر نیست. ماهیت اصلی بلوتوث امکان ارتباط با تعداد زیاد را نمی‌دهد و باید با

^۲ Low-Power Wide Area Network
^۳ Long Range Wide Area Network (LoRaWAN)

لینک ارتباطی می‌تواند توسط شبکه Ethernet و یا شبکه‌های داخلی طراحی شود. سپس اطلاعات توسط سرور شبکه در اختیار نرم‌افزار کاربر قرار می‌گیرد. در حقیقت دروازه‌راه و سرور شبکه مانند یک واسطه بین نرم‌افزار کاربر و دستگاه‌های انتهایی عمل می‌کند و امکان رسیدن داده به نرم‌افزار را فراهم کند [۱۳].



شکل ۱. معماری LoRaWAN [۱۳]

در شبکه LoRaWAN داده‌ها به صورت کامل^۹ بین دستگاه‌ها و برنامه کاربردی کاربر از طریق رمزگذاری^{۱۰} AES ارسال می‌شود. از این رو امنیت اطلاعات کاربر نیز تضمین می‌شود. فناوری LoRaWAN با به کارگیری لینک متقارن، امکان ارتباط کاملاً دو سویه را فراهم می‌کند. این مسأله به‌ویژه در سرویس‌های اینترنت اشیا که نیاز به ارسال دستورهای کنترلی از سمت سرور به تجهیزات انتهایی را دارند، بسیار با اهمیت است. در LoRaWAN نرخ ارسال داده مبتنی بر پروتکل لایه فیزیکی LoRa 27 kb/s است و هر دروازه‌راه می‌تواند داده‌های هزاران دستگاه انتهایی را جمع‌آوری کند. همچنین پوشش رادیویی هر دروازه‌راه شبکه لورا در مناطق باز و حومه شهر تا ۱۵ کیلومتر نیز می‌رسد [۱۳]. LoRaWAN دارای سه کلاس مختلف از دستگاه‌های نقطه پایانی^{۱۱} برای پاسخگویی به نیازهای مختلف منعکس شده در طیف و برد گسترده ای از برنامه‌های کاربردی است. دستگاه‌های LoRa هنگامی که در حال حرکت هستند، به خوبی کار می‌کنند، این ویژگی سبب خواهد شد که این فناوری برای ردیابی دارایی‌های محرک، مانند صنایع حمل و نقل، مفید باشد. از مهمترین مزایای این شبکه، این است که در کاربردهایی همچون کنترل وسایل یک ساختمان مستقل، بسیار مناسب بوده و به کمک این شبکه حتی می‌توانیم شبکه اختصاصی خود را نیز برآورد و ایجاد و مدیریت کنیم [۸-۱۲].

طراحی شامل حسگرهای مختلفی است که برای سنجش پارامترهای مفید آب مانند pH، ضریب هدایت و کیفیت آب‌های موجود در هر کشور قابل استفاده خواهد بود [۱۰]. همچنین می‌توان از سیستم اینترنت اشیا مبتنی بر شبکه LoRaWAN در نظارت و کنترل آب و هوا استفاده کرد [۱۱]. اخیراً در زمینه طراحی سیستم با امنیت بالا نیز از قابلیت رومینگ بین اپراتورهای مختلف شبکه‌های LoRaWAN سراسر کشور یا حتی کشورهای مختلف استفاده شده است [۱۲].

معماری شبکه LoraWan

در این معماری از اجزای اصلی بصورت زیر استفاده می‌شود:

گره‌ها^۴: در واقع حسگرهای کوچکی هستند که در محیط قرار داده می‌شوند، اطلاعات را جمع‌آوری و ارسال کرده یا دستورات را از سرور مرکزی دریافت می‌کنند. گره‌ها معمولاً تجهیزات کوچکی هستند که با باتری کار می‌کنند.

دروازه‌راه^۵: مسئولیت دریافت اطلاعات از گره‌ها و ارسال به سمت سرور یا بالعکس را دارند. زیرساخت ارتباطی دروازه‌راه می‌تواند ات‌رنِت یا ارتباطات سلولی و هر نوع روش مرسوم ارتباطی دیگر باشد. این دروازه‌راه‌ها می‌توانند محدوده‌ای از پنج تا پانزده کیلومتر را پوشش دهند و اطلاعات را در این محدوده با گره‌ها تبادل کنند.

سرور مرکزی^۶: مسئولیت اصلی سرور مدیریت شبکه است. سرور پیام‌های تکراری را تشخیص می‌دهد، از بین می‌برد و تأییدیه دریافت پیام‌ها را مدیریت می‌کند.

کامپیوتر کاربر: پس از اینکه اطلاعات از سمت سرور مرکزی جمع‌آوری شد، در نهایت اطلاعات به سمت کامپیوترهای نهایی و برنامه کاربردی کاربر ارسال می‌شود تا پردازش بر روی آن‌ها صورت گیرد [۱۳].

در شکل ۱، معماری ستاره‌ای^۷ شبکه LoRaWAN آورده شده است. معماری ساختار یک شبکه لورا LoRaWAN از دستگاه‌های انتهایی^۸ مبتنی بر لورا، دروازه‌راه‌ها، سرور شبکه و نهایتاً نرم‌افزار کاربر تشکیل شده است. توپولوژی اصلی شبکه لورا به صورت ستاره‌ای است. دستگاه‌های انتهایی اطلاعات را از طریق شبکه لورا به دروازه‌راه ارسال می‌کنند. پس از دریافت داده توسط دروازه‌راه، دروازه‌راه اطلاعات را بر روی یک لینک ارتباطی مبتنی بر اینترنت به سمت سرور شبکه می‌فرستد. این

^۴ Nodes

^۵ GateWay

^۶ CentralServer

^۷ Star of Stars

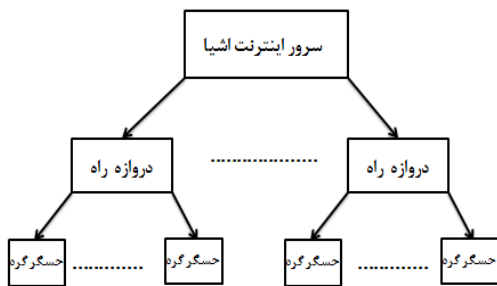
^۸ End-Device

^۹ End-to-End

^{۱۰} Standard Encryption Advanced

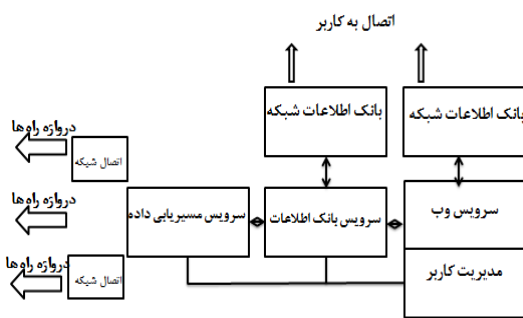
^{۱۱} end-point

بستر سیستم طراحی شده، کاملاً بی‌سیم شامل سرور اصلی اینترنت اشیا، دروازه‌راه و گره‌ها مطابق شکل ۲ است.



شکل ۲. بستر سیستم اینترنت اشیا موردنظر

سرور بخش اصلی بدنه اینترنت اشیا را بر عهده دارد. مسئولیت اصلی سرور مدیریت شبکه است. سرور پیام‌های تکراری را تشخیص می‌دهد، از بین می‌برد و تأییدیه دریافت پیام‌ها را مدیریت می‌کند. شکل ۳ مشخصات سرور موردنظر را نشان می‌دهد. بخش اول سرویس، مسیریابی داده است که وظیفه خواندن داده از دروازه‌راه را بر عهده داشته و مشخص می‌کند که آیا داده باید در آن ذخیره شود یا خیر. بخش دوم در سرور مربوط به خدمات بانک اطلاعات است. این بخش به‌طور دوره‌ای داده را بررسی کرده و اگر صف تفکیک داده‌ها پر باشد آن را در بخش دیگری ذخیره خواهد کرد. همچنین بخش سرور دارای بستر اجرای بانک اطلاعات بوده و کاربر می‌تواند داده را در این بخش مشاهده کند.



شکل ۳. قابلیت‌های سرور موردنظر

در شبکه لورا وظیفه دروازه‌راه‌ها ساماندهی حسگر گره‌ها و مسیریابی بسته‌ها از گره‌ها تا سرور است. دروازه‌راه‌ها شامل یک حافظه برای ذخیره‌کردن اطلاعات و ارسال آنها به سمت سرور است، در شکل ۴ ملزومات ماژول حسگر گره‌ها مشخص شده است.

تجهیزات مورد نیاز و پیاده‌سازی سیستم مبتنی بر شبکه لورا

با توجه به قابلیت رشد سریع این شبکه به بستری نیاز است که بتواند داده تولید شده توسط تمامی اجزا شبکه را جمع‌آوری و ذخیره نماید. برخی از سرویس‌های پیشرفته اینترنت اشیا به مکانیزم‌هایی جهت جمع‌آوری، تحلیل و پردازش داده خام حسگرها نیاز دارند تا زمینه بکارگیری آنها به عنوان اطلاعات کنترل عملیات فراهم گردد. برخی از داده‌های حسگرها ممکن است دارای حجم بسیار بالایی باشند، چراکه تعداد حسگرهای دستگاه‌های اینترنت اشیا بسیار زیاد است. بدیهی است که شاهد حجم بالایی از داده از سمت این نوع دستگاه‌ها باشیم. بنابراین به فناوری‌ها و یا الگوهای معماری جدیدی در حوزه جمع‌آوری، ذخیره، پردازش و بازیابی داده نیاز داریم.

هدف از این مقاله، ارائه روشی برای تولید سیستم اینترنت اشیا با استفاده از شبکه لورا جهت دستیابی به برنامه‌های مختلف شهر هوشمند است. برای این کار باید سه شاخص زیر را دنبال کرد:

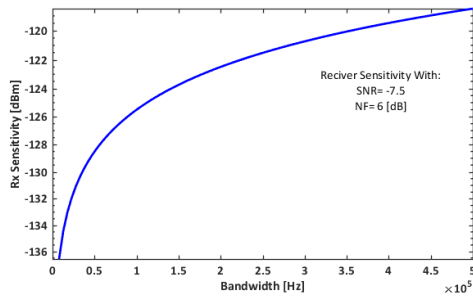
- ۱- چگونگی به حداکثر رساندن عمر باتری دستگاه‌های بی‌سیم با پروتکل LoRa.
- ۲- نحوه‌ی انتخاب درست مکان قرارگیری دروازه‌راه برای بهبود کارایی و کاهش هزینه‌ها.
- ۳- ارائه یک مسیر مناسب برای راه‌اندازی سرور شبکه، تعادل عملکرد در برنامه‌های کاربردی شهر هوشمند.

در نهایت با استفاده از یک نمونه سخت‌افزار و دروازه‌راه IOT اقدام به تست میدانی در شهر تهران کرده و پارامترهای مختلف مانند فاصله دریافت سیگنال، SF^{12} (فاکتور گسترش) و $RSSI^{13}$ (شاخص قدرت سیگنال دریافت شده) را اندازه‌گیری کرده تا با اطلاعات جمع‌آوری شده، محل‌های مناسب برای دروازه‌راه‌ها و فاصله آنها از هم را بدست آورده و به یک نقشه برای شبکه LoRaWAN برسیم. در ادامه پارامترهای مورد نیاز برای بهبود عملکرد و افزایش پوشش‌دهی شبکه لورا توصیف می‌شود. از این رو برای دستیابی به بهترین پاسخ باید تمام تجهیزات موردنیاز اعم از ماژول‌های مربوط به شبکه لورا و ماژول دروازه‌راه را شناسایی کرد.

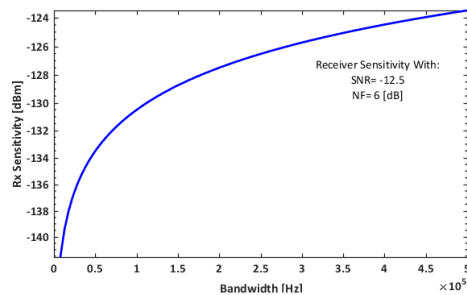
در این طراحی توپولوژی شبکه به‌صورت ستاره در نظر گرفته می‌شود. دستگاه‌های پایانی به عنوان یک نقطه و دروازه‌راه به عنوان ایستگاه‌های پایه یا ارتباط‌دهنده‌ها در سیستم شبکه لورا شناخته می‌شوند [۱].

¹² Spread Factor (SF)

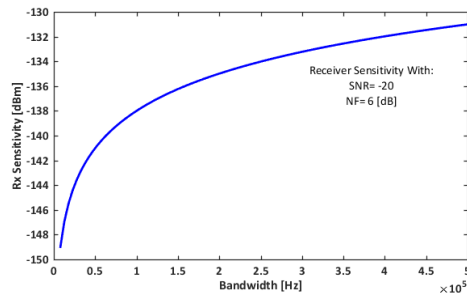
¹³ Received Signal Strength Indicator (RSSI)



شکل ۵. میزان حساسیت گیرنده در پهنای باند ۷/۸ تا ۵۰۰ کیلوهرتز و با ثابت بودن شکل نویز ۶ دسی بل و نرخ سیگنال به نویز ۷/۵- (فاکتور گسترش (۶)



شکل ۶. میزان حساسیت گیرنده در پهنای باند ۷/۸ تا ۵۰۰ کیلوهرتز و با ثابت بودن شکل نویز ۶ دسی بل و نرخ سیگنال به نویز ۱۲/۵- (فاکتور گسترش (۱۰)

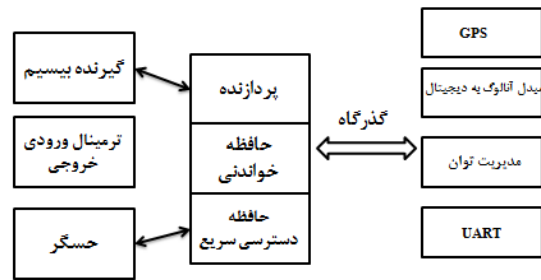


شکل ۷. میزان حساسیت گیرنده در پهنای باند ۷/۸ تا ۵۰۰ کیلوهرتز و با ثابت بودن شکل نویز ۶ دسی بل و نرخ سیگنال به نویز ۲۰- (فاکتور گسترش (۱۲)

میزان توان دریافتی گیرنده طبق رابطه ۲ محاسبه می شود [۱۴].

$$P_{RX}(dBm) = P_{TX}(dBm) + S(dBm) \quad (2)$$

در رابطه ۲، S حساسیت گیرندگی P_{TX} توان فرستنده و P_{RX} توان گیرنده و در واقع این رابطه، بیانگر بودجه لینک^{۱۵} است. در جدول ۱ میزان توان گیرنده به ازای توان فرستنده ثابت 20dbm (با توجه به مازول مورد استفاده) برای ۵ حالت مختلف حساسیت گیرنده محاسبه شده است، نتایج بیانگر آن است با افزایش حساسیت سیگنال، میزان توان دریافتی افزایش می یابد.



شکل ۴. ملزومات مازول حسگر گره ها

بررسی پارامترهای لورا

پارامترهای مختلفی در پوشش دهی تأثیرگذار است، از جمله این پارامترها نرخ داده ${}^{14}\text{Rb}$ ، پهنای باند، فاکتور گسترش و توان مصرفی می باشد، علاوه بر این، مهمترین ویژگی تأثیرگذار بر بقیه پارامترها در شبکه لورا حساسیت گیرنده است. حساسیت بیشتر گیرنده، سبب می شود تا دامنه قابل دسترسی بیشتر شده، به عبارت دیگر داده از دستگاه های حسگر از راه بسیار دور قابل شناسایی باشد. حساسیت گیرندگی به کمک رابطه ۱ بدست می آید [۱۴]:

$$S = -174 + 10 \log_{10}^{BW} + NF + SNR \quad (1)$$

که در رابطه ۱، BW نشان دهنده پهنای باند سیگنال (کیلوهرتز)، NF شکل نویز (برحسب دسی بل) و SNR نسبت سیگنال به نویز را نشان می دهد. شکل های ۵، ۶ و ۷ بیانگر منحنی تأثیر فاکتور گسترش در میزان کاهش یا افزایش حساسیت گیرندگی از پهنای باند ۷/۸ تا ۵۰۰ کیلوهرتز است. با توجه به منحنی ها و رابطه ۱، هر چقدر میزان SNR کاهش پیدا میکند (یا مقدار فاکتور گسترش افزایش پیدا کند)، میزان حساسیت گیرندگی نیز افزایش می یابد، بصورتیکه قابلیت دریافت سیگنال های ضعیف تر افزایش خواهد یافت. برای فاکتور گسترش ۱۲ بیشترین حساسیت گیرندگی (بیشترین برد) و برای فاکتور گسترش ۶ کمترین حساسیت گیرندگی (کمترین برد) را خواهیم داشت. با افزایش حساسیت گیرندگی، مقاومت شبکه در برابر نیز بیشتر شده و قابلیت پوشش دهی داده ها افزایش می یابد. همچنین با کاهش پهنای باند، حساسیت گیرندگی افزایش یافته و مقاومت به نویز بیشتر شده و در نهایت بسته های بیشتری دریافت خواهد شد.

^{۱۵} Link Budget

^{۱۴} Data Rate

جدول ۴. میزان نرخ بیت داده ارسالی با در نظر گرفتن نرخ کد ۱ برای ۳ حالت پهنای باند و پارامتر گسترش ۱۲.

CR=1 و SF=12	
BW [KHz]	R _b [bps]
۷/۸	۱۸/۲۸
۱۲۵	۲۹۲/۹۶
۵۰۰	۱۱۷۱/۹

در سیستم لورا، بیشترین مصرف انرژی، مربوط به شبکه سیستم در زمان ارسال و دریافت اطلاعات می‌باشد. انتظار می‌رود که مصرف انرژی در دستگاه‌های مورد استفاده به عوامل مختلفی چون فاکتور گسترش، تعداد بایت ارسالی، توان الکتریکی مصرفی جهت ارسال داده و تعداد ارسال بستگی داشته باشد. از پرمصرفترین تجهیزات در سیستم هوشمند مربوط به ماژول‌های حسگر گره است. بررسی کامل توان مصرفی به شش مرحله تقسیم می‌شود که عبارتند از: زمان شروع، اتصال شبکه، مد خواب، ارسال بسته، دریافت بسته و خاموش بودن است ولی بیشترین مصرف انرژی مربوط به زمان ارسال و دریافت بسته هاست و در این زمان می‌توان تقریبی مناسب از انرژی مصرفی سیستم را بدست آورد. فاکتورهای مهمی برای ارسال اطلاعات در سیستم هوشمند شبکه لورا مهم هستند، از جمله آن‌ها می‌توان به طول بسته، توان ارسالی و زمان ارسال اشاره داشت. برای یافتن انرژی مصرفی، از رابطه پایه آن بصورت ضرب توان در زمان، طبق رابطه ۴ استفاده می‌نماییم:

$$w(t) = p t \quad (2)$$

عواملی همچون پارامتر گسترش، طول بسته و توان بر روی دامنه و توان ارسالی تأثیر می‌گذارند. بنابراین رابطه ۴ را با جایگزینی توان و زمان، می‌توان به رابطه ۵ تبدیل کرد [۱۷]:

$$w_{(l)frame_send} = (P_{Tx} \cdot \beta) \cdot (\alpha \cdot l_{payload}) \quad (3)$$

در رابطه ۵، P_{Tx} توان ارسالی است که ضرب آن در β (ثابت تعادل) برابر توان می‌باشد، α پارامتر وابسته به فاکتور گسترش است، ضرب طول محتوای بار داده ($l_{payload}$) برحسب بیت در پارامتر فاکتور گسترش، برابر زمان ارسال است. با ترکیب ثابت α و ثابت β ضریب جدیدی به نام ϵ حاصل می‌شود که وابسته به فاکتور گسترش خواهد بود. رابطه ۶ مدل انرژی فرایند ارسال است [۱۷]:

$$w_{(l)frame_send} = P_{Tx} \cdot \epsilon_{SF} \cdot (l + B_{Head}) \quad (4)$$

شکل نويز و نرخ سیگنال به نويز، دو پارامتر تأثیرگذار بر حساسیت گیرنده هستند. افزایش نرخ سیگنال به نويز افزایش حساسیت گیرنده را بدنبال خواهد داشت.

جدول ۱. میزان توان گیرنده به ازای ثابت بودن توان فرستنده برای ۵ حالت مختلف حساسیت گیرنده.

توان فرستنده ۲۰ dbm	
میزان حساسیت گیرنده [dBm]	میزان توان گیرنده [dBm]
-۱۴۹	-۱۲۹
-۱۳۷	-۱۱۷
-۱۱۶	-۹۶
-۱۰۵	-۸۵
-۱۰۲	-۸۲

برای یافتن نرخ بیت، با توجه به رابطه (۳) داریم [۱۴]:

$$R_b = SF * \left[\frac{4}{4 + CR} \right] * \left[\frac{2^{SF}}{BW} \right] * 1000 \quad (3)$$

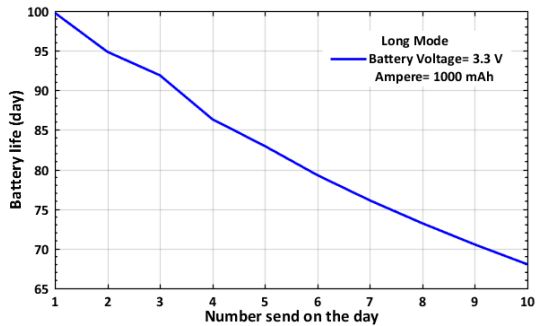
که در رابطه ۳، SF فاکتور گسترش BW پهنای باند سیستم بر حسب کیلوهرتز و $CR^{۱۶}$ (نرخ کد) و بین ۱ تا ۴ است [۱۵، ۱۶]. در جداول ۲ تا ۴، میزان نرخ بیت داده ارسالی با در نظر گرفتن نرخ کد ۱ برای ۳ حالت از پهنای باند و پارامتر گسترش متفاوت به نمایش آمده است. افزایش پهنای باند و کاهش فاکتور گسترش، باعث افزایش نرخ داده می‌شود.

جدول ۲. میزان نرخ بیت داده ارسالی با در نظر گرفتن نرخ کد ۱ برای ۳ حالت از پهنای باند و فاکتور گسترش ۶.

CR=1 و SF=6	
BW [KHz]	R _b [bps]
۷/۸	۵۸۵
۱۲۵	۹۳۷۵
۵۰۰	۳۷۵۰۰

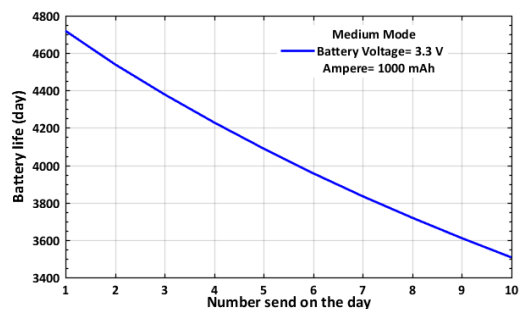
جدول ۳. میزان نرخ بیت داده ارسالی با در نظر گرفتن نرخ کد ۱ برای ۳ حالت پهنای باند و پارامتر گسترش ۱۰.

CR=1 و SF=10	
BW [KHz]	R _b [bps]
۷/۸	۶۰/۹۳۷
۱۲۵	۹۷۶/۵۶
۵۰۰	۳۹۰۶/۳



شکل ۸: نسبت تعداد دفعات ارسال در روز به عمر باتری در مد بلند جدول ۶. نشان دهنده عمر باتری در تعداد ارسال‌های متفاوت برای مد متوسط و در یک روز.

تعداد ارسال در روز	عمر باتری (روز)
۱	۴۷۱۹
۲	۴۵۴۰
۳	۴۳۷۹
۴	۴۲۲۹
۵	۴۰۸۹
۶	۳۹۵۷
۷	۳۸۳۴
۸	۳۷۱۹
۹	۳۶۱۰
۱۰	۳۵۰۷



شکل ۹: نسبت تعداد دفعات ارسال در روز به عمر باتری در مد متوسط جدول ۵. نشان دهنده عمر باتری در تعداد ارسال‌های متفاوت برای مد کوتاه و در یک روز.

تعداد ارسال در روز	عمر باتری (روز)
۱	۹۵۵۷۴
۲	۹۴۱۷۵
۳	۹۲۸۱۳
۴	۹۱۶۰۶
۵	۸۹۱۷۹
۶	۸۹۱۷۴
۷	۸۸۰۰۳
۸	۸۶۸۶۷
۹	۸۵۷۵۸
۱۰	۸۴۶۷۷

در این رابطه B_{Head} میزان طول سرایند بسته‌ها^{۱۷} برحسب بیت است که با طول محتوای داده رابطه مستقیم دارد. همچنین روند دریافت اطلاعات، همانند روند ارسالی اطلاعات است و طبق رابطه ۷ است [۱۷]:

$$W_{(1)frame_receive} = p_{Rx} \cdot \mathcal{E}_{SF} \cdot (I + B_{Head}) \quad (5)$$

اگر ارسال در اولین بار موفقیت‌آمیز باشد و دریافت نیز بار اول انجام شود رابطه توان مصرفی به شکل رابطه ۸ خواهد بود:

$$W_{frame_success} = W_{frame_receive} + W_{frame_send} \quad (8)$$

بنابراین کل انرژی مصرفی با در نظر گرفتن تعداد دفعات شکست، به شکل فرمول ۹ خواهد بود:

$$W_{(n)frame} = W_{frame_success} + nW_{frame_fail} \quad (6)$$

برای محاسبه‌ی مصرف انرژی، در گره‌ها باید تعداد دفعات ارسال را در انرژی لازم برای ارسال و دریافت و حالات بدون بار حساب کنیم. سپس این اعداد را در تعداد دفعات تکرار در شبانه روز ضرب کرده و در نهایت ظرفیت باتری را محاسبه نماییم. در نتیجه تعداد روزهای موردنظر پاسخگویی توان باتری حاصل می‌شوند. جداول ۵ تا ۷ میزان زمان مصرف در سه مد مختلف بلند، متوسط و کوتاه را نشان می‌دهد و شکل‌های ۸ تا ۱۰ نیز بیانگر تغییرات باتری در بازه ارسال داده موردنظر است.

جدول ۵. نشان دهنده عمر باتری در تعداد ارسال‌های متفاوت برای مد بلند و در یک روز.

تعداد ارسال در روز	عمر باتری (روز)
۱	۹۹/۷۸
۲	۹۴/۸۶
۳	۹۰/۹۱
۴	۸۶/۳۵
۵	۸۲/۹۶
۶	۷۹/۲۹
۷	۷۶/۱۰
۸	۷۳/۲۱
۹	۷۰/۵۳
۱۰	۶۸/۰۳

^{۱۷} Length of Packet Header

برای تست عملی پوشش‌دهی لورا، از عناصر اصلی زیر استفاده نمودیم:

گره:

گره موردنیاز طراحی باید دارای خصوصیتی همچون برد مفید ارسال و دریافت داده، امکان اتصال حسگرهای گوناگون مانند حسگر دما، رطوبت و ...، ارسال و دریافت امن داده به دروازه‌راه، امکان نصب در محیط‌های داخلی و خارجی و همچنین توان مصرفی مناسب باشد. برای تولید سیگنال در شبکه لورا نیاز به ماژول‌هایی با محدوده فرکانسی و توان مناسب داریم.

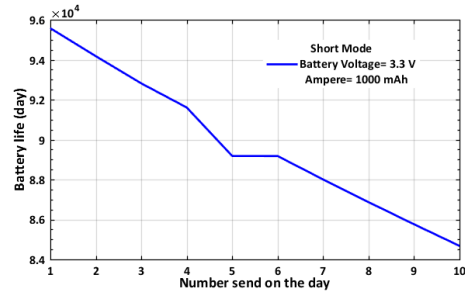
لایه فرکانس لورا با آنتن‌هایی در باندهای فرکانس مختلفی از ۴۳۳ و ۸۶۸ مگاهرتز در ارتباط است. گره مورد استفاده این پژوهش شامل ماژول توسعه لینکپ^{۱۸} بوده که در آن از ماژول لورا به نام RN2483 استفاده شده است [۲]. بطور کلی گره‌ها در شبکه می‌توانند یک حسگر ساده، یک حسگر با قابلیت تعیین مسیر و یا یک دروازه باشند. در شکل ۱۱ برد توسعه لینکپ نمایش داده شده است.



شکل ۱۱. برد توسعه لینکپ در حال عملکرد و اتصال به رایانه

مشخصات این ماژول به شرح زیر است:

- قابلیت اتصال از طریق پروتکل لورا و ماژول‌های رادیویی RN2483 یا RFM95W
- قابلیت اتصال از طریق پروتکل BLE ماژول‌های رادیویی HC-08
- قابلیت برنامه‌ریزی و ارتباط با پردازنده از طریق درگاه USB
- استفاده از میکرو Atmega328
- ۸ کانال ورودی آنالوگ با رنج ۰ تا ۳/۳ ولت
- ارتباط سریال



شکل ۱۰: نسبت تعداد دفعات ارسال در روز به عمر باتری در مد کوتاه

پارامتر گسترش و پهنای باند و میزان طول داده‌ها، در توان ارسالی تاثیری نداشته ولی در زمان ارسال تاثیر زیادی دارد. مطابق با جداول ۵ تا ۷ با تغییر برد از بلند به کوتاه شاهد آن هستیم که طول عمر باتری از ۶۸ روز به ۸۴۶۷۷ روز تغییر خواهد داشت. با توجه به شبیه‌سازی‌های انجام‌شده به این نتیجه می‌رسیم که در پارامتر گسترش ۶ و پهنای باند ۵۰۰ کیلوهرتز به بیشترین نرخ داده که ۳۷۵۰۰ بیت بر ثانیه است دست می‌یابیم. این نتیجه در شرایط خاص و مطابق با حساسیت گیرنده ۱۱۲- دسی‌بل متر می‌باشد. اگر توان ارسالی ۲۰ دسی‌بل متر باشد میزان بودجه لینک برابر با ۱۳۲- دسی‌بل می‌شود که این نشانگر پوشش کم و یا کوتاه با نرخ داده حداکثری بوده است. در این مد به دلیل کم بودن زمان ارسال داده‌ها، مصرف انرژی کمتر بوده و سبب افزایش طول عمر باتری خواهد شد. در شبیه‌سازی‌های انجام شده در مد متوسط در پارامتر گسترش ۱۰ و پهنای باند ۱۲۵ کیلوهرتز میزان نرخ داده دریافت شده برابر با ۹۷۶ بیت بر ثانیه است. همچنین در این مد میزان حساسیت گیرنده برابر با ۱۳۲- بوده و پوشش‌دهی به‌شدت افزایش یافته ولی همانطور که مشاهده شد نرخ داده به شدت کاهش یافته و به عدد ۹۷۶ بیت بر ثانیه رسیده است. برای پارامتر گسترش ۱۲ و پهنای باند ۷/۸ کیلوهرتز نرخ بیت داده‌ها به ۱۸ بیت بر ثانیه و حساسیت گیرنده به ۱۴۸- دسی‌بل متر رسیده است، نتایج حاصل‌شده نشانگر این است که در این مرحله پوشش حداکثری صورت گرفته و نرخ بیت کاهش یافته است ولی مصرف انرژی به دلیل افزایش زمان ارسال افزایش و طول عمر باتری به شدت کاهش می‌یابد.

تست عملی پوشش‌دهی شبکه لورا و مقایسه با نتایج

تئوری

بدیهی است که نتایج بدست آمده از تحلیل تئوری، در صورتی ارزشمند است که با مقادیر حاصل از تست عملی الگوریتم منطبق باشد، این موضوع بخصوص در کاربردهای هوشمندسازی و مباحث اینترنت اشیا جایگاه ویژه ای دارد.

^{۱۸} Linkap

دروازه راه:

پژوهش از معروفترین و پرکاربردترین آنها با قیمت مناسب بنام آردینو UNO استفاده شده است. پردازنده مرکزی UNO میکروکنترلر ATmega328 با سرعت پردازش 16MHz دارای 32KB حافظه فلش و 2KB حافظه SRAM می باشد. توسط این بستر، بسته های ارسالی مشخص شده و برای دروازه راهها ارسال می شود. با استفاده از نرم افزار متلب پارامترهای مختلف در محیط شهری مانند نویزهای مختلف محیط را در نظر گرفته، سپس با تغییر مقادیر مختلف از جمله CR، BW، SF، و نرخ داده سطح سیگنال دریافتی را بدست آورده تا به وسیله آن بتوان مسافت تحت پوشش دروازه راهها را تخمین بزنیم. پس از انجام شبیه سازیها و رسیدن به پاسخ مطلوب، با استفاده از بسترهای اینترنت اشیا موجود در بازار و برنامه ریزی آنها با نرم افزار آردینو مقادیر حاصل شده در نرم افزار متلب را در محیط واقعی تست می کنیم. سپس این مقادیر را با یکدیگر مقایسه خواهیم کرد. همزمان باید توجه داشت که مقادیر نویز شهری را با استفاده از طیف سنج مشاهده و محاسبه کنیم. این کار سبب خواهد شد که در محیط های مختلف، سطح نویزهای متفاوت حاصل شوند. سپس با استفاده از نتایج به دست آمده فاصله دروازه راههای لورا را تخمین می زنیم. بطور کلی سه مد، کوتاه برد با فاکتور گسترش 6 و پهنای باند 500 کیلوهرتز، مد میان برد با فاکتور گسترش 10 و پهنای باند 125 کیلوهرتز و مد برد بلند با فاکتور گسترش 12 و پهنای باند 7/8 کیلوهرتز را برای دو ارتفاع 1 متری و 5 متری برای سه مد کوتاه، متوسط و بلند تست می کنیم. تمامی نتایج را در ادامه با مقادیر تئوری و شبیه سازی شده مقایسه می کنیم سپس منطقه تست را تغییر داده تا تمامی پارامترهای تست شده را با محیط و شرایط نویزی مختلف تست نماییم. لازم به ذکر است که نویز محیطی در فرکانس 868 مگاهرتز یعنی فرکانس گره ها اندازه گیری می شود تا بتوان شرایط قبل را با شرایط جدید نویزی و تأثیر آن بر روی پوشش دهی مقایسه کرد. جداول 8، 9 و 10 نتایج تست در ارتفاع 1 و 5 متری به ترتیب برای سه مد کوتاه، متوسط و بلند با تغییر فواصل بین فرستنده و گیرنده برای "دروازه الف" نشان می دهد. همانطور که انتظار می رفت در فاصله 500 متری تمامی بسته ها (به جز یک بسته که در ارتفاع 1 متری در مد کوتاه برد بود) دریافت گشت، که پس از افزایش ارتفاع به 5 متر در آن مد نیز همه بسته ها در مقصد دریافت شد. تست میدانی پوشش دهی شبکه لورا برای دو ارتفاع 1 و 5

دروازه راه مورد نیاز باید دارای خصوصیات مناسب از جمله، قابلیت پیاده سازی دروازه های اینترنت اشیا، قابلیت نصب در فضای آزاد، قابلیت تغذیه از طریق اتصال شبکه، ارسال و دریافت امن داده به سرور (دو لایه رمزنگاری)، قابلیت اتصال تعداد زیاد گره، امکان اتصال به سرور از طریق شبکه بی سیم و انتقال حجم بالای داده باشد. در شکل 12 دروازه راه استفاده شده نمایش داده شده است.



شکل 12. نمونه دروازه راه قابل استفاده در سیستم اینترنت اشیا مبتنی بر لورا

سرور:

سرور مناسب برای این طرح باید دارای قابلیت هایی همچون دریافت حجم زیاد داده از سمت دروازه راهها، قدرت پردازشی بالا برای رمزگشایی داده، ذخیره سازی سریع و مطمئن داده، ارسال و دریافت امن داده (دو لایه رمزنگاری)، مقاوم در برابر حملات در بستر اینترنت، سیستم عامل و برنامه های کاربردی به روز و امن باشد.

برای تست عملی، مسافت به شش قسمت، 500، 700، 1000، 1400، 1700 و 2200 متر تقسیم شده است. علت انتخاب این فواصل به این دلیل است که در پایین ترین حالت یعنی 500 متر دروازه راه مورد نظر دارای پوشش دهی مناسبی است و در فاصله حداکثر یعنی 2200 متر پوشش دهی در آستانه قطع قرار خواهد گرفت. سپس در هر فاصله اقدام به ارسال 10 بسته کرده و تعداد دفعات رسیدن بسته ها را نیز محاسبه می نماییم. در این بخش، برای تست های عملی از بستر آردینو¹⁹ استفاده نمودیم [18]. بستر آردینو یک بستر سخت افزاری- نرم افزاری است که قسمت سخت افزاری آن از برد میکروکنترلر و قسمت نرم افزاری به منظور برنامه نویسی برد آردینو طراحی شده است، این بستر به منظور طراحی سریع و ساده و تست پژوهش های تعاملی با محیط طراحی شده است. انواع مختلفی از برد آردینو موجود است که برای انجام این

¹⁹ Arduino

متر در شکل‌های ۱۳، ۱۴ و ۱۵ برای مدهای برد کوتاه، متوسط و بلند آورده شده است.

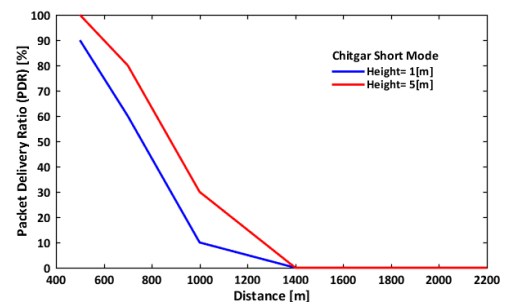
جدول ۸. تست میدانی پوشش‌دهی شبکه لورا در مد کوتاه برد برای ۶ فاصله مختلف در دو ارتفاع و میزان داده دریافتی گیرنده برای "دروازه‌راه الف".

شماره تست	Rssi [dBm]	مد	ارتفاع (متر)	فاصله (متر)	بسته دریافتی (درصد)
۱	-۱۰۰	کوتاه	۱	۵۰۰	۹۰
۲	-۱۰۰	کوتاه	۵	۵۰۰	۱۰۰
۳	-۱۰۵	کوتاه	۱	۷۰۰	۶۰
۴	-۱۰۵	کوتاه	۵	۷۰۰	۸۰
۵	-۱۱۰	کوتاه	۱	۱۰۰۰	۱۰
۶	-۱۱۰	کوتاه	۵	۱۰۰۰	۳۰
۷	۰	کوتاه	۱	۱۴۰۰	۰
۸	۰	کوتاه	۵	۱۴۰۰	۰
۹	۰	کوتاه	۱	۱۷۰۰	۰
۱۰	۰	کوتاه	۵	۱۷۰۰	۰
۱۱	۰	کوتاه	۱	۲۲۰۰	۰
۱۲	۰	کوتاه	۵	۲۲۰۰	۰

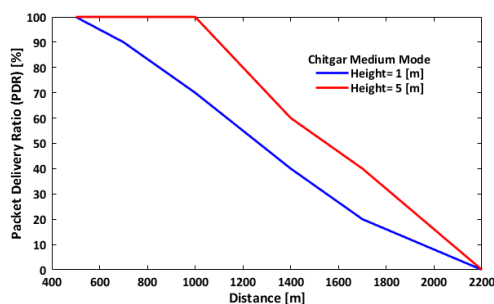
در این مد حاصل شده است. در فاصله ۱۷۰۰ که مد کوتاه برد می‌باشد، هیچ بسته‌ای به مقصد نرسیده است. در مد بلند در ارتفاع ۱ متری، شش بسته به مقصد رسیده و کارایی نسبتاً خوبی در این ارتفاع می‌توان داشت. با افزایش مسافت به ۲۲۰۰ متری، بسته‌ها در مد کوتاه و متوسط به مقصد نرسیده ولی در مد بلند، ۲ بسته در ارتفاع ۱ متری به مقصد رسیده و با افزایش ارتفاع، میزان سه برابری حاصل گشته و ۶۰ درصد از بسته‌ها به مقصد رسیده است.

جدول ۹. تست میدانی پوشش‌دهی شبکه لورا در مد متوسط برد برای ۶ فاصله مختلف در دو ارتفاع و میزان داده دریافتی گیرنده برای "دروازه‌راه الف".

شماره تست	Rssi [dBm]	مد	ارتفاع (متر)	فاصله (متر)	بسته دریافتی (درصد)
۱	-۱۰۰	متوسط	۱	۵۰۰	۱۰۰
۲	-۱۰۰	متوسط	۵	۵۰۰	۱۰۰
۳	-۱۰۵	متوسط	۱	۷۰۰	۹۰
۴	-۱۰۵	متوسط	۵	۷۰۰	۱۰۰
۵	-۱۱۰	متوسط	۱	۱۰۰۰	۷۰
۶	-۱۱۰	متوسط	۵	۱۰۰۰	۱۰۰
۷	-۱۲۵	متوسط	۱	۱۴۰۰	۴۰
۸	-۱۲۵	متوسط	۵	۱۴۰۰	۶۰
۹	-۱۲۵	متوسط	۱	۱۷۰۰	۲۰
۱۰	-۱۲۵	متوسط	۵	۱۷۰۰	۴۰
۱۱	۰	متوسط	۱	۲۲۰۰	۰
۱۲	۰	متوسط	۵	۲۲۰۰	۰



شکل ۱۳. تست میدانی پوشش‌دهی شبکه لورا در مد کوتاه برد برای دو ارتفاع ۱ و ۵ متر برای "دروازه‌راه الف".



شکل ۱۴. تست میدانی پوشش‌دهی شبکه لورا در مد متوسط برد برای دو ارتفاع ۱ و ۵ متر برای "دروازه‌راه الف".

در جدول ۱۱ تست حساسیت گیرنده و نرخ داده برای سه پهنای باند با فاکتور گسترش متفاوت برای "دروازه‌راه الف" مشخص شده است. همانطور که از نتایج تئوری، انتظار می‌رفت در مدهای کوتاه نسبت به مدهای بلند، حساسیت گیرنده، کمتر است.

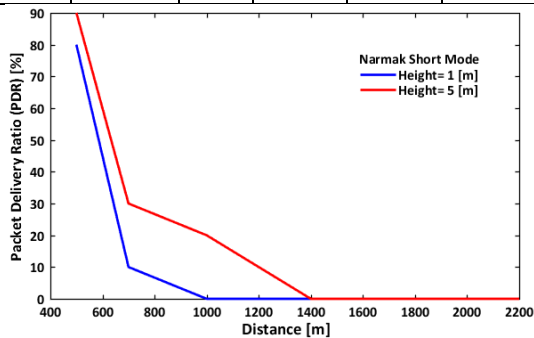
برای تست عملی در شهر تهران، از نقشه دروازه‌راه‌های تهران از غربی ترین دروازه‌راه (واقع در منطقه چیتگر به نام "دروازه‌راه الف") و شرقی ترین دروازه‌راه (واقع در منطقه نارمک به نام "دروازه‌راه ب") استفاده شده است. پس از افزایش فاصله به ۱۰۰۰ متر، دیگر اطمینانی به رسیدن بسته‌ها نخواهد بود و در ارتفاع ۱ متری تنها یک بسته به مقصد رسیده است و در ارتفاع ۵ متری این عدد ۳ برابر شده و به ۳ بسته افزایش یافته است. در بردهای متوسط نتایج خیلی بهتری نسبت به مد کوتاه برد به دست آمده، بطوریکه با افزایش ارتفاع به ۵ متر تمامی بسته‌ها به مقصد رسیده است و می‌توان این مد کاری و ارتفاع را با اطمینان از رسیدن داده‌ها استفاده کرد. در مد بلند تمامی بسته‌ها به مقصد رسیده و اطمینان کامل برای رسیدن بسته‌ها

جدول ۱۱. تست حساسیت گیرنده و نرخ داده برای سه پهنای باند با فاکتور گسترش متفاوت برای "دروازه‌راه الف".

مد	پهنای باند KHz	فاکتور گسترش	نرخ داده bps	حساسیت گیرنده dBm
کوتاه	۵۰۰	۶	۳۷/۵	-۱۱۲
متوسط	۱۲۵	۱۰	۹۷۶	-۱۳۲
بلند	۷/۸	۱۲	۱۸/۲۸	-۱۴۹

جدول ۱۲. تست میدانی پوشش‌دهی شبکه لورا در مد کوتاه برد برای ۶ فاصله مختلف در دو ارتفاع و میزان داده دریافتی گیرنده برای "دروازه‌راه ب".

شماره تست	Rssi [dBm]	مد	ارتفاع (متر)	فاصله (متر)	بسته دریافتی (درصد)
۱	-۱۰۵	کوتاه	۱	۵۰۰	۸۰
۲	-۱۰۵	کوتاه	۵	۵۰۰	۹۰
۳	-۱۰۵	کوتاه	۱	۷۰۰	۱۰
۴	-۱۰۵	کوتاه	۵	۷۰۰	۳۰
۵	۰	کوتاه	۱	۱۰۰۰	۰
۶	-۱۱۱	کوتاه	۵	۱۰۰۰	۲۰
۷	۰	کوتاه	۱	۱۴۰۰	۰
۸	۰	کوتاه	۵	۱۴۰۰	۰
۹	۰	کوتاه	۱	۱۷۰۰	۰
۱۰	۰	کوتاه	۵	۱۷۰۰	۰
۱۱	۰	کوتاه	۱	۲۲۰۰	۰
۱۲	۰	کوتاه	۵	۲۲۰۰	۰

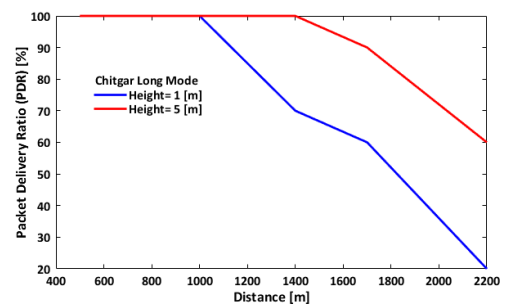


شکل ۱۶. تست میدانی پوشش‌دهی شبکه لورا در مد کوتاه برد برای دو ارتفاع ۱ و ۵ متر برای "دروازه‌راه ب".

شکل‌های ۱۹ و ۲۰، نسبت بسته‌های دریافتی توسط گیرنده به تغییر میزان پارامتر گسترش برای "دروازه‌راه الف" و "دروازه‌راه ب" نشان می‌دهد. همانطور که در منحنی مشخص است، با افزایش پارامتر گسترش، تعداد بسته‌های از دست رفته به شدت کاهش یافته و پوشش‌دهی شبکه لورا افزایش می‌یابد.

جدول ۱۰. تست میدانی پوشش‌دهی شبکه لورا در مد بلند برد برای ۶ فاصله مختلف در دو ارتفاع و میزان داده دریافتی گیرنده برای "دروازه‌راه الف".

شماره تست	Rssi [dBm]	مد	ارتفاع (متر)	فاصله (متر)	بسته دریافتی (درصد)
۱	-۱۰۰	بلند	۱	۵۰۰	۱۰۰
۲	-۱۰۰	بلند	۵	۵۰۰	۱۰۰
۳	-۱۰۵	بلند	۱	۷۰۰	۱۰۰
۴	-۱۰۵	بلند	۵	۷۰۰	۱۰۰
۵	-۱۱۰	بلند	۱	۱۰۰۰	۱۰۰
۶	-۱۱۰	بلند	۵	۱۰۰۰	۱۰۰
۷	-۱۲۵	بلند	۱	۱۴۰۰	۷۰
۸	-۱۲۵	بلند	۵	۱۴۰۰	۱۰۰
۹	-۱۲۵	بلند	۱	۱۷۰۰	۶۰
۱۰	-۱۲۵	بلند	۵	۱۷۰۰	۹۰
۱۱	-۱۴۰	بلند	۱	۲۲۰۰	۲۰
۱۲	-۱۴۰	بلند	۵	۲۲۰۰	۶۰

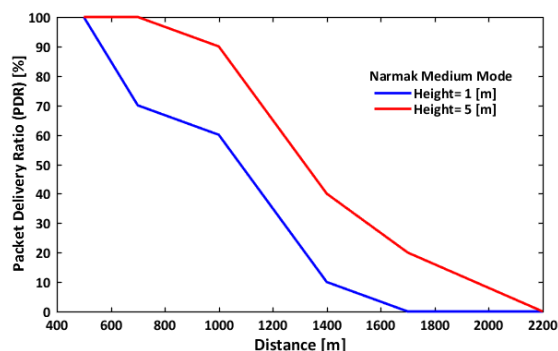


شکل ۱۵. تست میدانی پوشش‌دهی شبکه لورا در مد بلند برد برای دو ارتفاع ۱ و ۵ متر برای "دروازه‌راه الف".

جداول ۱۲، ۱۳ و ۱۴ نتایج تست در ارتفاع ۱ و ۵ متری به ترتیب برای سه مد کوتاه، متوسط و بلند با تغییر فواصل بین فرستنده و گیرنده را برای "دروازه‌راه ب" نشان می‌دهد. همانطور که انتظار داشتیم در فاصله ۵۰۰ متری تمامی بسته‌ها به گیرنده رسید جز یک بسته که در ارتفاع ۱ متری در مد کوتاه برد بود که پس از افزایش ارتفاع به ۵ متر در آن مد نیز همه بسته‌ها به مقصد رسید. پس از افزایش فاصله به ۱۰۰۰ متر، مد کوتاه برد تقریباً از استفاده خارج می‌شود و دیگر اطمینانی به رسیدن بسته‌ها نخواهد بود. در بردهای متوسط نتایج خیلی بهتری نسبت به مد کوتاه برد به دست آمده است. همچنین در فاصله ۱۷۰۰ که مد کوتاه برد می‌باشد، دیگر هیچ کارایی نداشته و هیچ بسته‌ای به مقصد نرسیده است. شکل‌های ۱۶، ۱۷ و ۱۸ برای بررسی مدهای برد کوتاه، متوسط و بلند ارائه شده است.

جدول ۱۳. تست میدانی پوشش‌دهی شبکه لورا در مد متوسط برد برای ۶ فاصله مختلف در دو ارتفاع و میزان داده دریافتی گیرنده برای "دروازه‌راه ب".

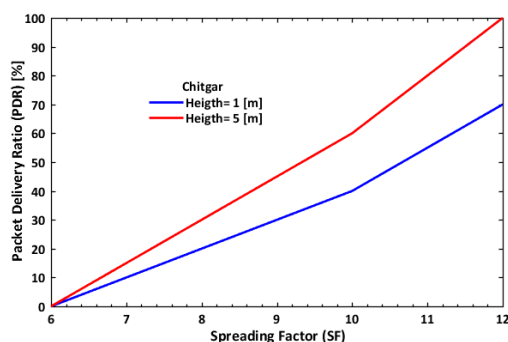
شماره تست	Rssi [dBm]	مد	ارتفاع (متر)	فاصله (متر)	بسته دریافتی (درصد)
۱	-۱۰۵	متوسط	۱	۵۰۰	۱۰۰
۲	-۱۰۵	متوسط	۵	۵۰۰	۱۰۰
۳	-۱۰۵	متوسط	۱	۷۰۰	۷۰
۴	-۱۰۵	متوسط	۵	۷۰۰	۱۰۰
۵	-۱۱۱	متوسط	۱	۱۰۰۰	۶۰
۶	-۱۱۱	متوسط	۵	۱۰۰۰	۹۰
۷	-۱۲۵	متوسط	۱	۱۴۰۰	۱۰
۸	-۱۲۵	متوسط	۵	۱۴۰۰	۴۰
۹	۰	متوسط	۱	۱۷۰۰	۰
۱۰	-۱۲۸	متوسط	۵	۱۷۰۰	۲۰
۱۱	۰	متوسط	۱	۲۲۰۰	۰
۱۲	۰	متوسط	۵	۲۲۰۰	۰



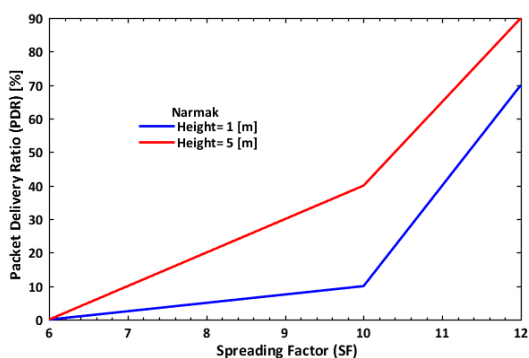
شکل ۱۷. تست میدانی پوشش‌دهی شبکه لورا در مد متوسط برد برای دو ارتفاع ۱ و ۵ متر برای "دروازه‌راه ب".

جدول ۱۴. تست میدانی پوشش‌دهی شبکه لورا در مد بلند برد برای ۶ فاصله مختلف در دو ارتفاع و میزان داده دریافتی گیرنده برای "دروازه‌راه ب".

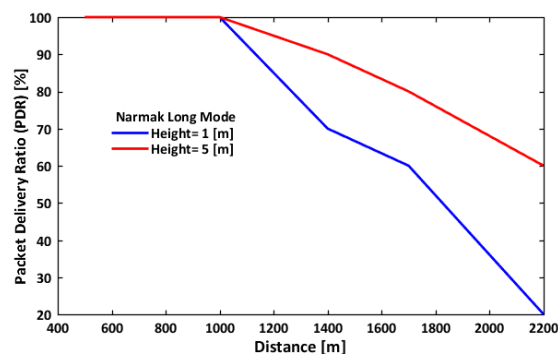
شماره تست	Rssi [dBm]	مد	ارتفاع (متر)	فاصله (متر)	بسته دریافتی (درصد)
۱	-۱۰۵	بلند	۱	۵۰۰	۱۰۰
۲	-۱۰۵	بلند	۵	۵۰۰	۱۰۰
۳	-۱۰۵	بلند	۱	۷۰۰	۱۰۰
۴	-۱۰۵	بلند	۵	۷۰۰	۱۰۰
۵	-۱۱۱	بلند	۱	۱۰۰۰	۱۰۰
۶	-۱۱۱	بلند	۵	۱۰۰۰	۱۰۰
۷	-۱۲۵	بلند	۱	۱۴۰۰	۷۰
۸	-۱۲۵	بلند	۵	۱۴۰۰	۹۰
۹	-۱۲۸	بلند	۱	۱۷۰۰	۶۰
۱۰	-۱۲۸	بلند	۵	۱۷۰۰	۸۰
۱۱	-۱۳۸	بلند	۱	۲۲۰۰	۲۰
۱۲	-۱۳۸	بلند	۵	۲۲۰۰	۶۰



شکل ۱۹. نسبت تغییر پارامتر گسترش به بسته‌های دریافتی برای برای "دروازه‌راه الف" در دو ارتفاع ۱ و ۵ متر.



شکل ۲۰. نسبت تغییر پارامتر گسترش به بسته‌های دریافتی برای "دروازه‌راه ب" در دو ارتفاع ۱ و ۵ متر.



شکل ۱۸. تست میدانی پوشش‌دهی شبکه لورا در مد بلند برد برای دو ارتفاع ۱ و ۵ متر برای "دروازه‌راه ب".

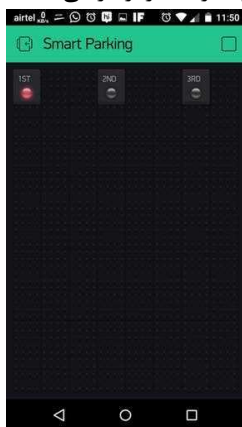
شکل ۲۱ نشان‌دهنده میزان تغییر بسته‌های دریافتی به‌ازای تغییر ارتفاع فرستنده برای "دروازه‌راه ب" است. برای این که تغییر ارتفاع دارای تفکیک‌پذیری مناسبی باشد از مسافت بلند برای این تست استفاده شده است. در مد بلند همانطور که در

افزایش ارتفاع سبب ایجاد شرایط دید مستقیم با پوشش‌دهی لورا خواهد شد. در پارامترهای گسترش ۱۰، سیستم در مقابل با نویز مقاوم‌تر شده و تقریباً داده‌ی یکسانی به دروازه‌راه می‌رسد.

دروازه راه و ماژول برد آردوینو مورد نظر است. حسگرهای فراصوت به دلیل سادگی ساخت، اتصال ساده به برد آردوینو و مقرون به صرفه بودن، گزینه مناسبی برای استفاده در پارکینگ هوشمند است. در این صورت داده‌ها از طریق شبکه LoRawAN به یک تلفن همراه متصل به این شبکه ارسال می‌شوند. مراحل اجرای پارکینگ هوشمند به این شرح است:

- ۱- برد آردینو با استفاده از سنسور اولتراسونیک وضعیت پارکینگ را تشخیص می‌دهد.
- ۲- داده‌های دریافتی از طریق ماژول فرستنده-گیرنده که به وسیله پورت سریال به آردینو متصل است، به دروازه راه، انتقال می‌یابد.
- ۳- دروازه راه LoRa به یک سرور LoRa متصل شده که داده‌ها در آن قابل مشاهده هستند.
- ۴- سرور LoRa، داده‌ها را به سرور ارسال کرده که در آنجا برنامه اصلی داده‌ها را از آن دریافت می‌کند.
- ۵- پس از مقایسه داده‌ها، وضعیت جدید پارکینگ در برنامه ذخیره خواهد شد.

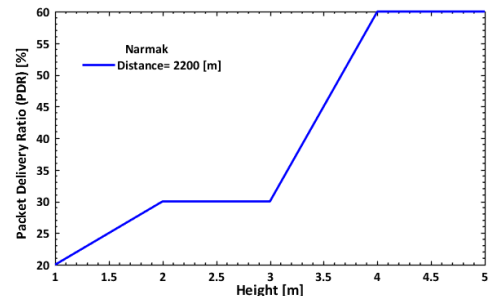
در عملکرد صحیح سیستم طراحی شده برای پارکینگ هوشمند این انتظار می‌رود که پس از قرارگرفتن هر وسیله بر روی حسگر وضعیت برنامه طراحی شده تغییر کند. برای این منظور در عمل، یک شی را به نزدیکی یکی از سنسورها آورده و همانطور که انتظار می‌رفت رنگ چراغ هشداردهنده در نرم‌افزار پارکینگ هوشمند روی موبایل پس از چند ثانیه تغییر خواهد کرد. مطابق با شکل ۲۲، در این طراحی هنگامی که مکان مورد نظر (روی حسگر) پر باشد (شی در آن مکان قرارگرفته باشد) چراغ هشدار به رنگ قرمز در می‌آید.



شکل ۲۲. بر روی حسگر هیچ شی (اتوموبیل) قرارنگرفته است.

به همین روال اگر چراغ هشدار سبز رنگ بود نشان‌دهنده خالی بودن مکان مورد نظر است که در شکل ۲۳ مشاهده می‌شود. همچنین در سیستم پیاده‌سازی شده، این امکان وجود دارد که

شکل ۲۱ نشان داده شده است، افزایش ارتفاع رابطه خطی با میزان بسته‌های دریافت شده داشته و اگر ارتفاع را افزایش دهیم، به تمامی بسته‌های ارسالی در گیرنده دسترسی پیدا می‌کنیم.



شکل ۲۱. نسبت تغییر ارتفاع فرستنده به بسته‌های دریافتی توسط گیرنده برای "دروازه راه ب" و در فاصله مد بلند ۲۲۰۰ متری.

شبیه‌سازی پارکینگ هوشمند مبتنی بر پارامترهای پوشش‌دهی لورا

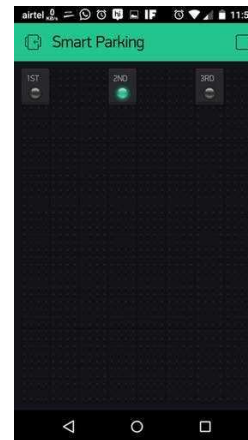
هدف از این پژوهش بکارگیری شبکه لورا و پارامترهای پوشش‌دهی آن در بهبود کاربردهای اینترنت اشیا برای هوشمندسازی شهر می‌باشد. بدین منظور در این بخش با استفاده از ماژول لورا و اطلاعات بدست آمده از بخش‌های قبل، پارکینگ هوشمند را شبیه‌سازی می‌کنیم. سیستم پارکینگ هوشمند در یک صفحه اینترنتی قابل رؤیت است، بصورتی که قابل دسترس بودن جایگاه پارک را به کاربران اعلام کرده و آنها را از مکان فعلی، به نزدیکترین مکان دقیق محوطه، راهنمایی می‌کند. دامنه کاربرد سیستم پارکینگ هوشمند در آینده، این است که می‌تواند بر روی یک نرم افزار روی تلفن هوشمند یا حتی سیستم نقشه ماهواره ای نمایش داده شود و رانندگان همواره اطلاع خواهند داشت که آیا فضای آزاد در هر پارکینگ وجود دارد یا خیر. برای انجام تست و برای اطمینان از این که اطلاعات ارسالی از دروازه راه مورد نظر به سیستم ما برسد، از آخرین دروازه راه در غرب تهران (در منطقه چیتگر به نام "دروازه الف") و آخرین دروازه راه در شرق تهران (در منطقه نارمک به نام "دروازه راه ب") استفاده می‌کنیم. در نهایت تأثیر مقدار نویز محیط در پوشش‌دهی مورد بررسی قرار می‌گیرد تا میزان بهینه این پارامتر حاصل شود. باید توجه داشت که مقادیر نویز شهری در این پژوهش با استفاده از طیف‌سنج (اسپکتروم آنالایزر) بررسی شده است. این کار سبب خواهد شد که در محیط‌های مختلف، سطح نویزهای متفاوت را بتوان بدقت بررسی و تحلیل کرد. یکی از اهداف که در پیاده‌سازی باید مدنظر قرار گیرد، انتخاب حسگر مناسب با قابلیت اتصال به

افزایش یافته و این امر سبب کاهش نرخ بیت می‌شود. بنابراین، این روش برای محیط شهری، پروبیز و تلفاتی کاربرد دارد.

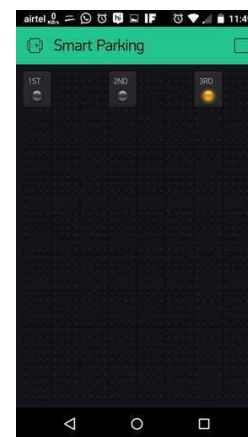
با نرخ بیت بسیار پایین که مناسب اینترنت اشیا است تعداد بسته‌های رسیده به مقدار قابل توجهی افزایش یافته و پوشش دهی نیز افزایش می‌یابد. همچنین، نتیجه شد که افزایش ارتفاع سبب به وجود آمدن شرایط دید مستقیم فرستنده یا گیرنده شده که این امر قدرت انتقال را بالا خواهد برد. برای مصرف انرژی کمتر باید مقدار پارامتر گسترش را کم کرد که سبب می‌شود عمر باتری افزایش یابد.

نتایج کلی در جدول ۱۵ برای محیط با نویز بالا (داخل شهر) و محیط کم نویز (خارج شهر و حومه) برای افزایش بهبود پارامترهای پوشش‌دهی لورا بیان شده است. از جمله مواردی که در پژوهش‌های گذشته در بررسی پوشش دهی لورا بدان توجه نشده و باعث کاهش کارایی سیستم گشته، پارامتر نویز محیط است، که در این پژوهش از توان نویز ۱۵- تا ۱۱۰- dBm استفاده شد. لازم به ذکر است که نویز در مناطق غیرشهری حدوداً برابر با ۱۱۰- dBm بوده و همین امر سبب افزایش پوشش‌دهی شبکه لورا در مناطق خارج از شهر می‌شود. حساسیت گیرندگی در مد کوتاه برد در برابر نویز بسیار آسیب‌پذیر بوده و بسیاری از اطلاعات از بین رفته یا درصد دریافت بسته‌ها کاهش می‌یابد. مواقعی که محیط نویز کمتری دارد، فاکتور گسترش کم باعث کاهش مصرف انرژی شده و طول عمر باتری بیشتر می‌گردد. در مد بلند، افزایش ارتفاع رابطه خطی با میزان بسته‌های دریافت‌شده داشته و اگر ارتفاع را افزایش دهیم به تمامی بسته‌های ارسالی در گیرنده دسترسی پیدا می‌کنیم. پارامتر دیگر طول عمر باتری است که در پژوهش‌های گذشته به آن توجه نشده است، در حالیکه با نتایج بدست آمده در این پژوهش به این نتیجه رسیدیم که برای کاهش مصرف انرژی و افزایش عمر باتری باید فاکتور گسترش کاهش و پهنای باند افزایش یابد. در مقایسه پژوهش‌های انجام شده نزدیک به این پژوهش، می‌توان به دو مرجع اشاره کرد که در جدول ۱۶ نتایج موردنظر مشاهده می‌شود. نتایج حاصله بیانگر بهبود پوشش‌دهی (دریافت بسته‌های بیشتر) در روش ارایه شده می‌باشد.

پس از ضربه‌زدن به روی چراغ، رنگ آن به رنگ نارنجی تغییر کرده و این به معنی رزرو مکان موردنظر در پارکینگ می‌باشد که در شکل ۲۴ مشاهده می‌شود.



شکل ۲۳. بر روی حسگر شی‌ای قرار گرفته است.



شکل ۲۴. امکان رزرو مکان موردنظر کاربر (پارکینگ هوشمند).

جمع‌بندی نتایج حاصل از شبیه‌سازی و تست پوشش‌دهی شبکه لورا

در بین تحقیقات انجام شده تاکنون، تحقیق کاملی به منظور تخمین پوشش دهی شبکه لورا برای انواع پارامترهای اساسی انجام نشده ولی در این مقاله با هدف بهبود کاربرد اینترنت اشیا، تمامی پارامترهای اساسی بررسی شده و مدل عملی نیز براساس محاسبات ارائه شده است. با توجه به نتایج تست در چند مرحله به این نتیجه می‌رسیم که با افزایش فاکتور گسترش و کم کردن پهنای باند در مد بلند، حساسیت گیرندگی افزایش می‌یابد، در این حالت مقاومت در برابر نویز

جدول ۱۵. پارامترهای مختلف قابل تنظیم در بهبود پوشش‌دهی شبکه لورا

پارامتر	فاکتور گسترش	پهنای باند	ارتفاع	فاصله	عمر باتری	بسته‌های دریافت شده	پوشش‌دهی شبکه
محیط با نویز زیاد (داخل شهر)	افزایش	کاهش	افزایش	کاهش	کاهش	افزایش	تقویت می‌شود
محیط با نویز کم (خارج شهر یا حومه)	کاهش	افزایش	افزایش	کاهش	افزایش	افزایش	تقویت می‌شود

جدول ۱۶. نمایش پارامترهای مختلف پوشش‌دهی شبکه لورا و مقایسه با مراجع

توان نویز (dbm)	افزایش نرخ بسته ارسالی	عمر باتری	فاصله (متر)	SF	Rssi dbm	ارتفاع (متر)	پهنای باند (khz)	شماره مرجع
بررسی نشده	بررسی نشده	بررسی نشده	۱۱۰۰	۱۲ و ۷	-۹۸ -۱۰۹	۱/۵	۲۵۰	[۱۹]
بررسی نشده	بررسی نشده	بررسی نشده	۷۰۰	۱۲	-۲۰ -۱۲۰	۴۰	۱۲۵	[۲۰]
۱۵- الی ۱۱۰-	افزایش تا ۵۰ بایت (sf=12)	افزایش از ۶۸ روز به ۸۴۶۷۷ روز با کاهش فاکتور گسترش	الی ۵۰۰ ۲۲۰۰	۷ و ۱۰ الی ۱۲	-۱۰۰ -۱۴۰	۵	۵۰۰-۸	روش ارایه شده در این مقاله

Communications Magazine, Vol. 49, No. 11, pp. 68-75, (2011).

- [3] M. Chui, M. Löffler and R. Roberts, "The internet of things", McKinsey Quarterly, Vol. 2, No. 2010, pp.1-9, (2010).
- [4] W. He, G. Yan and L. Da Xu, "Developing vehicular data cloud services in the IoT environment", IEEE Transactions on Industrial Informatics, Vol. 10, No. 2, pp. 1587-159, (2014).
- [5] LORIIOT.io, LoRa Gateways and Concentrators | LORIIOT.io. [Online]. Available: <https://www.loriot.io/lorawan.html>. [Accessed: 05-May-2019].
- [6] What is LoRaWAN™ | LoRa Alliance™, Home page. [Online]. Available: <https://loralliance.org/resource-hub/what-lorawantm>. [Accessed: 05-May-2019].
- [7] A. J. Wixted, P. Kinnaird, H. Larijani, A. Tait, A. Ahmadinia, and N. Strachan, "Evaluation of LoRa and LoRaWAN for wireless sensor networks," 2016 Ieee Sensors, (2016).
- [8] S. Subashini, R. Venkateswari, and P. Mathiyalagan, "A Study on LoRaWAN for Wireless Sensor Networks," Advances in Intelligent Systems and Computing Communication and Signal Processing, pp. 245-252, (2018).
- [9] J. Navarro-Ortiz, S. Sendra, P. Ameigeiras, and J. M. Lopez-Soler, "Integration of LoRaWAN and 4G/5G for the Industrial Internet of Things," IEEE Communications Magazine, vol. 56, no. 2, pp. 60-67, (2018).

نتیجه گیری

در سال‌های اخیر عملکرد نامناسب پروتکل‌های ارتباطی موجود برای برقراری ارتباط بین دستگاه‌های مختلف، باعث شده است که شبکه لورا که یکی از پروتکل‌های اصلی دوربرد توان پایین، ویژه اینترنت اشیا است مطرح شود. بررسی پوشش‌دهی شبکه لورا از جمله مباحث مطرح در این حوزه است، که تاکنون بررسی کاملی در این زمین ارائه نشده است. هدف از این مقاله توصیف پارامترهای مورد نیاز برای بهبود عملکرد و افزایش پوشش‌دهی شبکه لورا است، برای این منظور در محیط مختلف نویزی مانند داخل شهر یا خارج شهر، پارامترهای مختلف بررسی شده و تأثیر هرکدام بر پوشش‌دهی شبکه و میزان دریافت بسته‌های ارسالی به دست آمده است. در نهایت یک برنامه کاربردی مبتنی بر پارامترهای موردنظر شبکه لورا اجرا شده و روشی کم‌هزینه، با پوشش زیاد و نرخ داده ثابت برای هوشمندسازی یک پارکینگ در شهر تهران، شبیه‌سازی شده است.

مراجع

- [1] L. Atzori, A. Iera and G. Morabito, "The internet of things: A survey: Computer networks", Vol. 54, No. 15, pp. 2787-2805, (2010).
- [2] X. Li, R. Lu, et al, "Smart community: an internet of things application", IEEE

- [15] Semtech.com. (2019). What is LoRa? | Semtech LoRa Technology | Semtech. [online] Available at: <https://www.semtech.com/lora/what-is-lora> [Accessed 15 Apr. 2019].
- [16] L. Vangelista and M. Centenaro, "Worldwide Connectivity for the Internet of Things Through LoRaWAN," *Future Internet*, vol. 11, no. 3, p. 57, (2019).
- [17] Developers.semtech.com/library/tech-papers-and-guides/calculate-battery-life, [Accessed 16 May. 2020].
- [18] linkap. (2019). IoT | Linkap IoT Core | [online] Available at: <https://linkap.net/iot-core/> [Accessed 23 Aug. 2019].
- [19] E. Chahine, W. Lewin and M. Özger, "Evaluation of Peer-to-Peer LoRa for Geolocation Usage in a Rural Environment," *KTH Royal Institute of Technology, Stockholm*, (2019).
- [20] A. Carlsson, R. Franksson, I. Kuzminykh "Measuring a LoRa Network Performance, Possibilities and Limitations," 18th International Conference, NEW2AN 2018, and 11th Conference, ruSMART, pp.116-128, (2018).
- [10] Y.-T. Liu, B.-Y. Lin, X.-F. Yue, Z.-X. Cai, Z.-X. Yang, W.-H. Liu, S.-Y. Huang, J.-L. Lu, J.-W. Peng, and J.-Y. Chen, "A solar powered long range real-time water quality monitoring system by LoRaWAN," 2018 27th Wireless and Optical Communication Conference (WOCC), (2018).
- [11] A. Candia, S. N. Represa, D. Giuliani, M. A. Luengo, A. A. Porta, and L. A. Marrone, "Solutions for SmartCities: proposal of a monitoring system of air quality based on a LoRaWAN network with low-cost sensors," 2018 Congreso Argentino de Ciencias de la Informática y Desarrollos de Investigación (CACIDI), (2018).
- [12] L. Vangelista and M. Centenaro, "Worldwide Connectivity for the Internet of Things Through LoRaWAN," *Future Internet*, vol. 11, no. 3, p. 57, (2019).
- [13] M. Adhikari and H. Gianey, "Energy efficient offloading strategy in fog-cloud environment for IoT applications," *Internet of Things*, No. 6, p.100053, (2019).
- [14] Rfwireless-world.com. (2019). LoRa Link Budget Calculator | LoRa Link Budget Formula. [online] Available at: <https://www.rfwireless-world.com/calculators/LoRa-Link-Budget-Calculator.html> [Accessed 23 Aug. 2019].