

# طراحی و پیاده‌سازی سخت‌افزاری لایه فیزیکی نوری برای کاربرد در شبکه حسگر بی‌سیم

علی طهماسی<sup>۱</sup>، کارشناسی‌ارشد؛ یوسف صیفی‌کاویان<sup>۲</sup>، دانشیار؛ هومان کعبی<sup>۳</sup>، استادیار

۱- دانشکده مهندسی - دانشگاه شهید چمران اهواز - اهواز - ایران - a-tahmasebi@mscstu.scu.ac.ir

۲- دانشکده مهندسی - دانشگاه شهید چمران اهواز - اهواز - ایران - y.s.kavian@scu.ac.ir

۳- دانشکده مهندسی - دانشگاه شهید چمران اهواز - اهواز - ایران - h.kaabi@scu.ac.ir

**چکیده:** شبکه حسگر بی‌سیم متشکل از گره‌های ارزان، چندکاره و با اندازه کوچک هستند که می‌توانند عملیات حس کردن محیط، جمع‌آوری و پردازش داده و برقراری ارتباط را انجام دهند. امروزه با توسعه ارتباطات بی‌سیم، به نرخ داده بالاتری به‌ویژه برای کاربردهای چندرسانه‌ای نیاز است. ارتباطات بی‌سیم نوری (OWC) می‌تواند نرخ داده بالاتر و ارتباطی بسیار امن نسبت به ارتباط رادیویی فرکانس بالا فراهم کنند و در کاربردهایی مانند ارتباطات نوری زیر آب بسیار مفید می‌باشد. در این مقاله یک شبکه حسگر بی‌سیم با توانایی انتقال داده به‌صورت نوری طراحی و ساخته شده است. قسمت‌های مختلف گره حسگر طراحی شده، به‌صورت عملی آزمایش می‌شود و سپس پارامترهای ارتباط نوری اندازه‌گیری خواهد شد. همچنین یک پروتکل دسترسی به رسانه مناسب شبکه حسگر بی‌سیم نوری مناسب ارائه می‌گردد. در شبکه حسگر بی‌سیم نوری طراحی شده، همه بخش‌های گره و سرخوشه ماژولار هستند بدین معنی که می‌توان فرستنده، گیرنده و حسگرها را دوباره طراحی و جایگزین کرد. نتایج آزمایش نشان می‌دهد که بیشینه فاصله انتقال داده با نرخ داده ۳۰۰ و ۶۰۰ بیت بر ثانیه برابر ۱۸ متر با نرخ خطای بی‌تی صفر درصد و ۲۱ متر با نرخ خطای بی‌تی ۱۰ درصد می‌باشد.

**واژه‌های کلیدی:** شبکه حسگر بی‌سیم، ارتباطات بی‌سیم نوری، ارتباط رادیویی، پروتکل دسترسی به رسانه، نرخ خطای بیت.

## Design and Hardware Implementing of Optical Physical Layer for Wireless Sensor Network Applications

A. Tahmasi<sup>1</sup>, MSc; Y. Seifi Kavian<sup>2</sup>, Associate Professor; H. Kaabi<sup>3</sup>, Assistant Professor

1- Faculty of Engineering, Shahid Chamran University of Ahvaz, Ahvaz, Iran, Email: a-tahmasebi@mscstu.scu.ac.ir

2- Faculty of Engineering, Shahid Chamran University of Ahvaz, Ahvaz, Iran, Email: y.s.kavian@scu.ac.ir

3- Faculty of Engineering, Shahid Chamran University of Ahvaz, Ahvaz, Email: h.kaabi@scu.ac.ir

**Abstract:** Wireless sensor network (WSN) consists of some small and cheap nodes which could communicate together, process gathered data, and sense the environment. Today's developments in wireless communication systems, causes higher data rate for multimedia applications. The optical wireless communication (OWC) can provide higher data rates and more secured communication links rather than radio frequency (RF) technology for some applications such as underwater communications. In this paper, the optical technology is employed for data transmission in WSNs. An optical wireless sensor network (OWSN) is realized based on sensor nodes and cluster head (CH). Different hardware parts of designed sensor boards are evaluated and the optical communication parameters are measured. An optimized media access control protocol called VMAC is presented. In the proposed OWSN, both nodes and CH are modular. The experimental results show that the maximum transmission distance for 300bps and 600bps baud rates are 18m with 0% BER and 21m with 10% BER, respectively.

**Keywords:** Wireless sensor network, optical wireless communication, radio frequency, media access control, bit error rate.

تاریخ ارسال مقاله: ۱۳۹۶/۰۸/۱۱

تاریخ اصلاح مقاله: ۱۳۹۷/۰۱/۱۸

تاریخ پذیرش مقاله: ۱۳۹۷/۰۳/۰۶

نام نویسنده مسئول: یوسف صیفی‌کاویان

نشانی نویسنده مسئول: ایران - اهواز - بلوار گلستان - دانشگاه شهید چمران اهواز - دانشکده مهندسی - گروه برق

## ۱- مقدمه

استفاده برای یک سیستم نوری در قیاس با سیستم‌های رادیویی و نیز پهنای باند بسیار زیاد موجود در باند فرسرخ که نیازی به مجوز ندارد و برای همگان قابل دستیابی است مهم‌ترین دلایلی بوده‌اند که توجه را به سمت سیستم‌های نوری معطوف ساخته‌اند [۱۲].

به‌عنوان محیطی برای ارتباطات کوتاه برد، مخابرات فرسرخ چند مزیت مهم نسبت به مخابرات رادیویی فراهم می‌آورد. نخست آنکه در مخابرات نوری از دیودهای لیزری<sup>۷</sup> (LD) و یا دیودهای نوری<sup>۸</sup> (LED) به‌عنوان فرستنده و از فوتودیود به‌عنوان گیرنده استفاده می‌شود که بسیار ارزان‌قیمت می‌باشند. علاوه بر این قابلیت کار در سرعت‌های بالا نیز مقدور می‌باشد. دوم آن‌که نور فرسرخ به همان اتاقی که در آن تولید می‌شود، محدود می‌شود. با وجود این مزیت‌ها سیستم‌های فرسرخ دارای معایبی هم هستند، اول آنکه نور قابلیت نفوذ و گذر از دیوار را ندارد. دوم این‌که نویزهای فرسرخ زیادی در محیط موجود است که منابع مختلفی دارند.

در جدول ۱ مقایسه بین سیستم‌های فرسرخ IM/DD<sup>۹</sup> و سیستم‌های رادیویی صورت گرفته است. این‌که کدام سیستم برای یک عملکرد خاص مناسب‌تر است به عوامل زیادی بستگی دارد.

جدول ۱: مقایسه بین سیستم رادیویی و فرسرخ

موارد مقایسه	رادیویی	فرسرخ	توضیحات
مجوز برای پهنای باند	می‌خواهد	نمی‌خواهد	
از دیوارها عبور می‌کند؟	آری	خیر	پوشش کمتر، ایمنی بیشتر
نویز غالب	کاربران دیگر	نور زمینه	

چنانچه قابلیت تحرک کاربر و یا برد زیاد و یا مصرف توان کم‌تر و یا امکان ایجاد ارتباط از داخل دیوارها مدنظر باشد، سیستم‌های رادیویی و اگر ارتباطات کوتاه برد، ظرفیت و سرعت بالا و یا سادگی تجهیزات و قیمت ارزان‌تر مورد نظر باشد، سیستم‌های نوری اهمیت بیشتری پیدا می‌کنند.

در این مقاله از فناوری ارتباط نوری برای انتقال داده در شبکه حسگر بی‌سیم استفاده می‌شود. قسمت‌های مختلف سخت‌افزاری طراحی می‌شوند و پارامترهای گره مانند نسبت خطای بیت<sup>۱۰</sup> (BER) نسبت به فاصله برای نرخ‌های مختلف داده اندازه‌گیری و تحلیل می‌شوند. همچنین، یک پروتکل دسترسی به کانال برای شبکه حسگر بی‌سیم نوری<sup>۱۱</sup> (VMAC) پیشنهاد می‌شود.

ساختار مقاله به‌صورت ادامه است. در بخش ۲، فرستنده و گیرنده‌های فرسرخ توضیح داده می‌شود. بخش ۳، شبکه حسگر بی‌سیم نوری را با جزئیات توضیح می‌دهد و در بخش ۴ پروتکل VMAC توضیح داده می‌شود. اندازه‌گیری و تحلیل بعضی از پارامترهای شبکه حسگر بی‌سیم نوری در بخش ۵ تشریح می‌شود. در نهایت نتیجه‌گیری و کارهای آینده گفته می‌شود.

شبکه‌های حسگر بی‌سیم<sup>۱</sup> (WSN) شامل گره‌های ارزان، چندکاره، با اندازه کوچک هستند و می‌توانند ارتباطات بی‌سیم با دامنه کم را ایجاد کنند [۱،۲]. با توسعه روش‌های ارتباطی بی‌سیم، پردازش‌های نهفته و حسگرها توجه زیادی به ساخت شبکه‌های مجهز به حسگر جلب شده است [۳،۴]. با توسعه ارتباطات بی‌سیم نیاز به نرخ‌داده بالاتر در یک شبکه دسترسی بی‌سیم به‌ویژه برای کاربردهای چندرسانه‌ای بی‌سیم بالا می‌رود. تا به امروز فناوری رادیویی<sup>۲</sup> (RF) ابزار اصلی برای ارائه این خدمات بوده است و بسیاری از سازمان‌های ارتباطی به افزایش ظرفیت‌های ارتباطات اختصاص‌یافته است [۵]. با بیشتر شدن محتوای بی‌سیم در هوا نسبت به گذشته شبکه‌های بی‌سیم متراکم شدند و تداخل تولیدشده سیگنال‌ها از دستگاه‌های بی‌سیم هنگام طراحی یک دستگاه بی‌سیم جدید به یک نگرانی تبدیل شده است [۶]. بنابراین بررسی فناوری‌های جایگزین برای ارتباط رادیویی دستگاه‌های بی‌سیم لازم است که به‌طور بالقوه می‌تواند افزایش تقاضای شبکه را رسیدگی کند و تداخل کمتری ایجاد کند. در حال حاضر یک فناوری جایگزین اصلی ارتباطات بی‌سیم نوری<sup>۳</sup> (OWC) است. ارتباطات بی‌سیم نوری این پتانسیل را دارد که نرخ‌های داده بسیار بالا و ارتباط‌های بسیار امن نسبت به فناوری رادیویی ارائه دهد [۷،۸].

ارتباطات بی‌سیم نوری را می‌توان شامل ارتباطات مادون‌قرمز<sup>۴</sup> (IR)، ارتباطات نور مرئی<sup>۵</sup> (VL) و ارتباطات اشعه ماوراءبنفش<sup>۶</sup> (UV) دانست. طیف تمام نوری را می‌توان به سه بخش تقسیم کرد. طول موج اشعه فرابنفش طول موج از ۱۰۰ تا ۴۰۰ نانومتر است. نور مرئی در طول موج ۴۰۰ تا ۷۸۰ نانومتر قرار دارد و محدوده مادون‌قرمز از طول موج ۷۸۰ نانومتر تا ۳۰۰ میکرومتر است [۹].

فناوری‌های مرتبط با مادون‌قرمز به‌طور گسترده‌ای در برنامه‌های کاربردی بر روی نوت‌بوک یا تلفن‌های همراه گسترش یافته است. ارتباطات نور مرئی کاربردهای متعددی از جمله پخش هشدار در چراغ‌های اتاق، پیام‌های کنترلی در خانه‌های هوشمند، آگهی‌های تبلیغاتی، انتقال اطلاعات ترافیک دارد و در چراغ خودرو جهت تعیین فاصله از ماشین مقابل آن استفاده می‌شود. اشعه فرابنفش هم برای کاربردهای تجاری و نظامی مناسب است [۱۰].

برای تبدیل شدن شبکه‌های بی‌سیم نوری به جایگزینی مناسب به شبکه‌های مبتنی بر فناوری رادیویی، اجزای ارتباطی کارآمد و پروتکل‌های شبکه مناسب برای ارتباط نوری جهت‌دار باید طراحی شود. به‌طور کلی سودمند بودن یک شبکه بی‌سیم نوری نسبت به یک شبکه بی‌سیم مبتنی بر فناوری رادیویی در شرایطی وجود دارد اما چالش در ساخت عملی شبکه‌های کارآمد و مقرون‌به‌صرفه در مقایسه با فناوری فرکانس رادیویی مرسوم باقی‌مانده است.

استفاده از نور فرسرخ به‌عنوان محیطی مناسب برای ایجاد شبکه‌های داخلی بی‌سیم به‌عنوان رقیبی جدی برای مخابرات رادیویی مطرح بوده است [۱۱]. ارزان‌قیمت بودن گیرنده-فرستنده‌های مورد

## ۲- فرستنده و گیرنده‌های فرورسرخ

تغذیه کمی کار می‌کنند. اما در عوض حساسیت آن‌ها کم و در حدود ۱۰ تا ۱۵ دسی‌بل می‌باشد. در مقابل APD ها با وجود حساسیت بالا، گران‌قیمت هستند و به ولتاژهای تغذیه بالاتر برای کار احتیاج دارند. حساسیت کم دیودهای PIN را تا حدودی می‌توان با افزایش سطح گیرنده جبران کرد.

برخی از پژوهش‌های انجام شده در این زمینه، در ادامه بررسی می‌شود. در سال ۲۰۱۴، Agrawal و همکاران [۱۴] یک شبکه حسگر بی‌سیم نوری مبتنی بر لیزر VCSEL پیاده‌سازی کرده‌اند و یک پروتکل دسترسی به رسانه را ارزیابی کرده‌اند. در سال ۲۰۱۲، Xie و همکاران شبیه‌سازی یک پروتکل مسیریابی با قابلیت پیکربندی مجدد برای شبکه بی‌سیم نوری (OW) انجام داده‌اند اما تأیید آزمایشی از عملکرد آن ارائه نشده است [۱۵]. در سال ۲۰۰۵، Milner و Desai مقیاس‌پذیری شبکه‌های حسگر OW و چگونگی بهبود عملکرد با پیکربندی خودکار مجدد را تجزیه و تحلیل کرده‌اند [۱۶].

## ۳- ساختار پیشنهادی شبکه حسگر بی‌سیم نوری

شبکه‌های حسگر بی‌سیم نوری شامل تعدادی از ارتباط‌های دوطرفه بین یک سرخوشه<sup>۳</sup> (CH) و گره‌های<sup>۴</sup> دیگر می‌باشد [۱۷]. کانال انتشار، فضای آزاد بین دو دستگاه می‌باشد. در این مقاله دو نوع سخت‌افزار با نام‌های گره و سرخوشه طراحی و ساخته می‌شود. سخت‌افزار گره و سرخوشه شبیه به هم می‌باشد ولی در سرخوشه از مدارات بیشتری برای ایجاد میدان دید بزرگ‌تر استفاده می‌شود. همچنین در سرخوشه رابط سریال برای انتقال اطلاعات به رایانه وجود دارد. گره‌ها هم دارای حسگر دما LM35 برای اندازه‌گیری دما می‌باشند.

شکل ۱ طرح کلی سیستم طراحی شده برای سرخوشه و گره را نشان می‌دهد. بخش‌های اصلی شامل گیرنده، پردازنده، فرستنده و حسگرها می‌باشد. عملکرد داخلی هر یک از قسمت‌های بالا با جزئیات بیشتر و همچنین نحوه ارتباط هر یک از بخش‌ها با یکدیگر در ادامه توضیح داده می‌شود. همچنین گره حسگر طراحی شده دارای رابط سیستم برنامه‌نویسی (ISP) می‌باشد به طوری که میکروکنترلر می‌تواند پس از لحیم‌شدن بر روی برد دوباره برنامه‌ریزی شود.

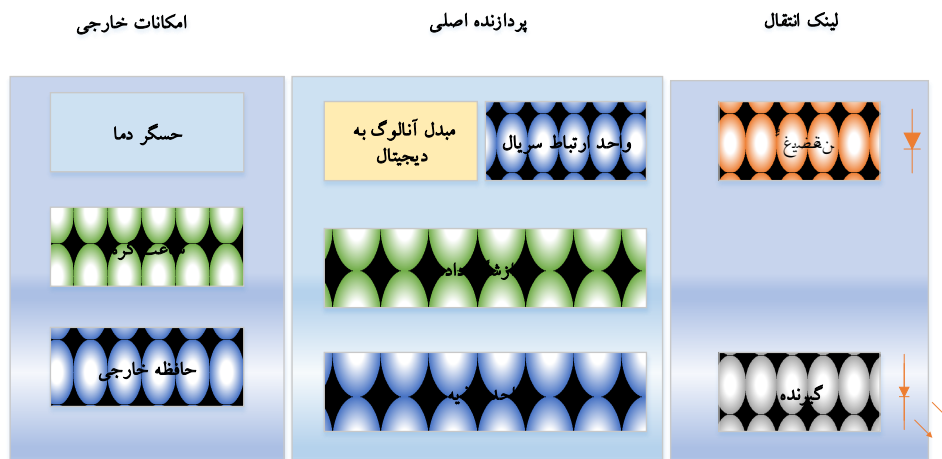
یک سیستم بی‌سیم فرورسرخ به‌طور کلی از سه قسمت تکمیل می‌شود. یک فرستنده (معمولاً LD یا LED) که تولیدکننده سیگنال نوری است، محیط انتشار که از آن به‌عنوان کانال یاد می‌شود و یک گیرنده که معمولاً دیودهای PIN یا APD<sup>۲</sup> می‌باشد. طول‌موج‌های حدود ۷۸۰ تا ۹۵۰ نانومتر مهم‌ترین طول‌موج‌هایی هستند که می‌توان برای کاربردهای فرورسرخ استفاده کرد، زیرا عمده نور تولیدی توسط LED ها و یا LD های ارزان‌قیمت در این گستره می‌باشد و همچنین بهترین پاسخ گیرنده‌های نوری ارزان‌قیمت نیز در همین بازه می‌باشد [۱۹]. بنابراین تحقق ارتباط فرورسرخ در این طول‌موج‌ها بهترین گزینه ممکن است.

مقایسه بین LD و LED در جدول ۲ مشاهده می‌شود. LED ها قیمت کمتری دارند و تشعشعات را در سطح بزرگی انجام می‌دهند بنابراین توان نوری که از خود گسیل می‌کنند در واحد سطح کمتر بوده و برای چشم بی‌خطر هستند، در عوض بازده کمی دارند (در حدود ۲۰-۱۰ درصد از توان الکتریکی دریافتی را به توان نوری تبدیل می‌کنند) و سرعت مدولاسیون آن‌ها از چند ده مگاهرتز بیشتر نمی‌شود [۱۳] همچنین نور تولیدی آن‌ها گستره وسیعی دارد و بعد از فیلتر کردن آن، مقدار زیادی نویز هم وارد سیستم می‌شود. در مقابل LD ها بازده بالای ۳۰ تا ۷۰ درصد دارند، سرعت مدولاسیون آن‌ها به چند ده گیگاهرتز هم می‌رسد و نور تولیدی آن‌ها در طول موج خاصی متمرکز است، اما در عوض گران‌قیمت می‌باشند و به دلیل تمرکز نور برای چشم خطرناک می‌باشند.

جدول ۲: مقایسه بین LED و LD

مشخصه	LED	LD
پهنای باندهای مدولاسیون	تا چند ده مگاهرتز	تا چند گیگاهرتز
بازده تبدیل	۲۰-۱۰ درصد	۷۰-۳۰ درصد
ایمنی چشم	عموماً ایمن	ایمن‌سازی لازم است
قیمت	پایین	متوسط به بالا

گیرنده‌های نوری هم به دو دسته کلی تقسیم می‌شوند. دیودهای PIN ارزان‌قیمت هستند، اثرات تغییر دما بر آن‌ها کم است و با ولتاژ



شکل ۱: طرح سخت‌افزار طراحی شده برای سرخوشه و گره

اندازه‌گیری شده به وسیله حسگر دما یا داده تولیدی واحد USART می‌باشد. فرستنده از مدولاسیون OOK<sup>۱۵</sup> استفاده می‌کند که در سطح سخت‌افزاری گیت به وسیله دو گیت NAND و NOT پیاده‌سازی می‌شود [۱۹]. خروجی گیت NAND برای تقویت به بیس ترانزیستور BC639 وارد می‌شود. داده‌های مدوله‌شده از طریق LED مادون قرمز TSIP5201 ارسال می‌شوند. از ۵ عدد LED برای پوشش دادن میدان دید بیشتر به شکل حلقه‌ای استفاده می‌شود.

### ۳ ۴ حسگر دما

یکی از وظایف سخت‌افزار گره ساخته شده اندازه‌گیری دمای محیط و ارسال آن‌ها به سرخوشه می‌باشد. در این طراحی از حسگر دمای LM35 در مقیاس آزمایشگاهی استفاده می‌شود.

### ۳ ۴ پردازنده

هسته اصلی پردازش سخت‌افزاری به وسیله میکروکنترلر ATmega128A از شرکت Atmel پیاده‌سازی شد [۱۸]. از مبدل آنالوگ به دیجیتال برای تبدیل ولتاژ ورودی از حسگر دما به داده دیجیتال استفاده می‌شود. پس از تبدیل دمای محیط به داده دیجیتال، اطلاعات دمای محیط از طریق واحد ارتباط سریال به فرستنده حسگر و سپس به سرخوشه ارسال می‌شوند.

### ۳ ۴ حافظه خارجی

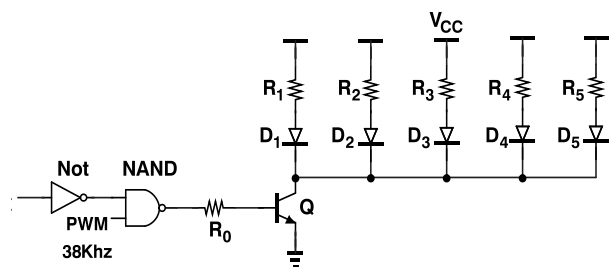
حافظه خارجی برای ذخیره کردن داده‌هایی استفاده می‌شود که حافظه داخلی میکروکنترلر ظرفیت ذخیره‌سازی آن‌ها را ندارد. همچنین اطلاعات زمان بندی الگوریتم همگام‌سازی VMAC که باید در تمامی مراحل اجرای الگوریتم حفظ شود، مانند زمان‌های ارسال و دریافت گره یا تعداد گره‌های موجود در خوشه به همراه مشخصات شناسه گره‌ها در حافظه خارجی ذخیره می‌شوند.

### ۳ ۴ ساعت داخلی

در طراحی حسگر بی سیم، قابلیت محاسبه زمان در نظر گرفته شده است که با استفاده از تراشه DS1307 انجام می‌گیرد.

### ۳ ۵ طراحی مدار فرستنده

در شکل ۲ مدار فرستنده نشان داده شده است. چون گیرنده فقط می‌تواند موج ۳۸ کیلوهرتز را آشکار کند، یک ورودی موج ۳۸ کیلوهرتز است که به وسیله میکروکنترلر تولید می‌شود و ورودی دیگر دما



شکل ۲: مدار فرستنده

### ۳ ۶ طراحی مدار گیرنده

قسمت گیرنده به وسیله یک ماژول TSOP طراحی شده است [۲۰]. ماژول TSOP یک مدار داخلی برای تقویت پالس کدگذاری شده از فرستنده فروسرخ دارد. در ورودی گیرنده یک فتودیود PIN قرار دارد که سیگنال نوری را به جریان الکتریکی تبدیل می‌کند این سیگنال سپس از یک کنترل بهره خودکار (AGC)، کنترل آستانه خودکار (ATC) و یک فیلتر میان‌گذر و در نهایت از یک دمدولاتور عبور می‌کند. خروجی دمدوله‌شده ترانزیستور را راه‌اندازی می‌کند. کلکتور این ترانزیستور خروجی ماژول را تشکیل می‌دهد.

در ساخت گره و سرخوشه از یک طرح جدید استفاده شده است و همه بخش‌های آن به صورت ماژولار طراحی شده است و می‌توان فرستنده و گیرنده و حسگرها را دوباره طراحی کرد. شکل ۳ سخت‌افزار گره، همراه با فرستنده/گیرنده و حسگر را نشان می‌دهد.

ارتباطات جهت‌دار نوری، یک چالش عمده طراحی می‌باشد. این پروتکل برای برقراری ارتباطات جهت‌دار موفق بین سرخوشه و گره‌های دیگر استفاده می‌شود. اگرچه پروتکل‌های دسترسی به رسانه متعددی وجود دارد اما بیشتر آن‌ها برای ارتباط رادیویی طراحی و بهینه‌شده‌اند [۲۲،۲۳،۲۵،۲۴]. دلیل اصلی این است که در ارتباطات جهت‌دار فضای آزاد، بیشتر گره‌های درون شبکه نمی‌توانند آزاد بودن کانال را تشخیص دهند.

در این مقاله یک پروتکل دسترسی به رسانه برای شبکه‌های حسگر بی‌سیم نوری طراحی شده است. پروتکل دسترسی به رسانه، شامل مراحل ذیل می‌باشد.

الف. پس از روشن شدن، سرخوشه یک سیگنال به همه گره‌ها ارسال می‌کند. این سیگنال شامل آدرس سرخوشه و همچنین یک سیگنال هم‌زمان‌سازی می‌باشد.

ب. گره‌هایی در حالت دریافت داده قرار دارند به محض دریافت سیگنال در صورتی که سیگنال دریافتی آدرس سرخوشه و همچنین سیگنال هم‌زمان‌سازی را دریافت و تشخیص دهند، زمان سنج گره‌ها فعال می‌شود.

ج. با فعال شدن زمان سنج گره‌ها به مدت زمان مشخص بر اساس شناسه (ID) شروع به ارسال داده (دما) می‌نمایند. هر گره پس از ارسال داده وارد حالت خواب می‌شود و برای دریافت داده منتظر سیگنال هم‌زمان‌سازی می‌ماند.

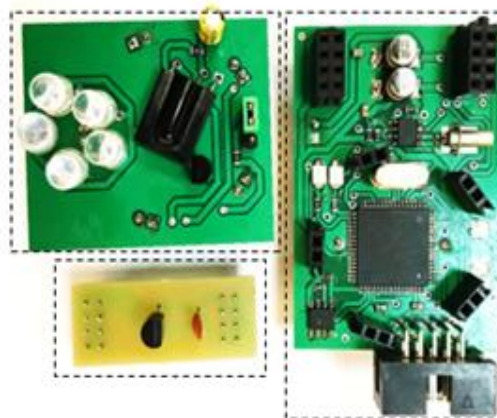
د. گره‌ها ID خود را به همراه دمای محیط یا داده‌های دیگر به سرخوشه ارسال می‌نمایند.

ه. سرخوشه پس از دریافت داده‌ها آن‌ها را ذخیره می‌نماید.

و. سرخوشه پس از اتمام داده گره‌ها سیگنال هم‌زمان‌سازی را ارسال می‌نماید.

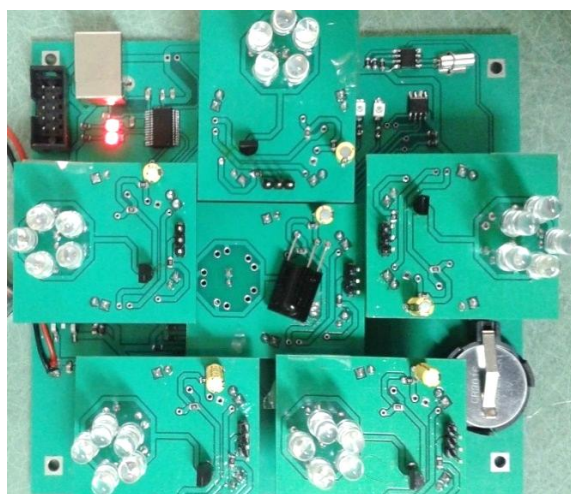
نرم‌افزار کدویژن CodeVisionAVR برای کد نویسی پروتکل و پیاده‌سازی آن بر روی گره‌ها و سرخوشه استفاده شده است. برای آزمایش پروتکل، دما و داده‌های تولیدی به همراه ID گره‌ها، به سمت سرخوشه ارسال می‌شود سپس از ترمینال CodeVisionAVR داده‌ها ذخیره و نتایج نشان داده می‌شود.

در شکل ۵ ساختار طراحی شده برای آزمایش پروتکل نشان داده شده است. ابعاد ساختار به ترتیب ۱۴۰×۷۸×۱۰۰ سانتی‌متر می‌باشد. گره‌ها در چهار گوشه ساختار مکعبی قرار گرفته‌اند و داده‌ها را به سمت سرخوشه منتقل می‌کند و سرخوشه از طریق رابط سریال داده‌ها را به کامپیوتر منتقل می‌کند. همان‌طور که در آزمایش بعدی نشان داده می‌شود، گره‌های طراحی شده قادر خواهند بود تا ۲۱ متر داده منتقل



شکل ۳: سخت‌افزار گره شامل فرستنده/گیرنده و حسگر

در شکل ۴، سخت‌افزار سرخوشه نشان داده شده است. مشخصات سخت‌افزاری سرخوشه، مانند سخت‌افزار گره می‌باشد که از پنج فرستنده برای ارسال اطلاعات در جهت‌های مختلف استفاده می‌کند. سرخوشه یک رابط USB برای نمایش اطلاعات دریافتی بر روی کامپیوتر دارد.



شکل ۴: سخت‌افزار سرخوشه به همراه فرستنده/گیرنده

#### ۴ پروتکل دسترسی به رسانه پیشنهادی (VMAC)

در شبکه‌های کوتاه برد جهت‌دار، ارتباط تنها می‌تواند بین گره‌هایی که در خط دید یکدیگر هستند برقرار شود [۲۱]. در هنگام برقراری ارتباط بین یک سرخوشه و یک گره دیگر سرخوشه تنها از فرستنده‌ای که آن گره در میدان دید آن می‌باشد استفاده می‌کند. این روش باعث مصرف انرژی کمتری می‌شود ولی مانع از آن می‌شود که گره‌های بیشتری تشخیص دهند که کانال دسترسی سرخوشه آزاد است. بنابراین، پیاده‌سازی یک پروتکل کنترل دسترسی رسانه مناسب بهینه برای

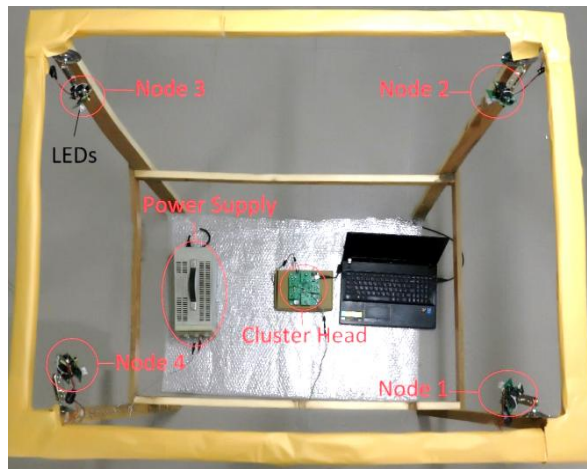
#### ۵-۴ آزمایش اول: تخمین بیشینه فاصله و نرخ انتقال داده

در این آزمایش اثر ارتباط‌های خط دید<sup>۱۶</sup> (LOS) برای انتقال داده بررسی می‌شود. ارتباط خط دید به این معنی است که فرستنده و گیرنده روبروی یکدیگر و در یک خط قرار دارند. هدف این آزمایش، تعیین بیشینه فاصله و نسبت به نرخ خطای بی‌تی (BER) به ازای نرخ داده‌های<sup>۱۷</sup> (BR) مختلف می‌باشد. این آزمایش در فضایی که علاوه بر نور لامپ مهتابی نور محیط هم وجود داشت، انجام گرفت.

نرخ خطای بی‌تی<sup>۱۸</sup> و نسبت خطای بی‌تی، دو پارامتر اساسی برای ارزیابی کیفیت ارتباط می‌باشند. نرخ خطای بی‌تی تعداد خطاهای بی‌تی نسبت به واحد زمان است اما نسبت خطای بی‌تی برابر تعداد بیت‌های خطا تقسیم بر کل تعداد بیت‌های منتقل شده است. در این پژوهش از نسبت خطای بی‌تی استفاده می‌شود چون مقایسه بهتری نسبت به نرخ خطای بی‌تی در نرخ داده‌های مختلف می‌دهد [۲۶]. در این آزمایش از ۵ عدد LED به‌عنوان فرستنده اطلاعات استفاده می‌شود. جدول ۳ و شکل‌های ۶ و ۷ مقادیر BER تا نرخ داده ۴۸۰۰ و فاصله ۱۰ متر را نشان می‌دهد. با افزایش فاصله بین گره‌ها، نرخ خطای بیت افزایش می‌یابد که این افزایش خطای بی‌تی، با افزایش فاصله و افزایش نرخ ارسال، رابطه خطی ندارد و باید بر اساس کاربرد موردنظر و مناسب انتخاب شود.

بر اساس نتایج به‌دست آمده، بیشینه فاصله بین فرستنده و گیرنده با نرخ ۳۰۰ بیت بر ثانیه و ۶۰۰ بیت بر ثانیه به ترتیب ۱۸ متر با BER صفر و ۲۱ متر با BER ۱۰ درصد می‌باشد (در جدول ۳ نشان داده نشده است).

کنند اما جهت پیاده‌سازی و آزمایش پروتکل و همچنین محدودیت فضا از این ساختار استفاده می‌شود.



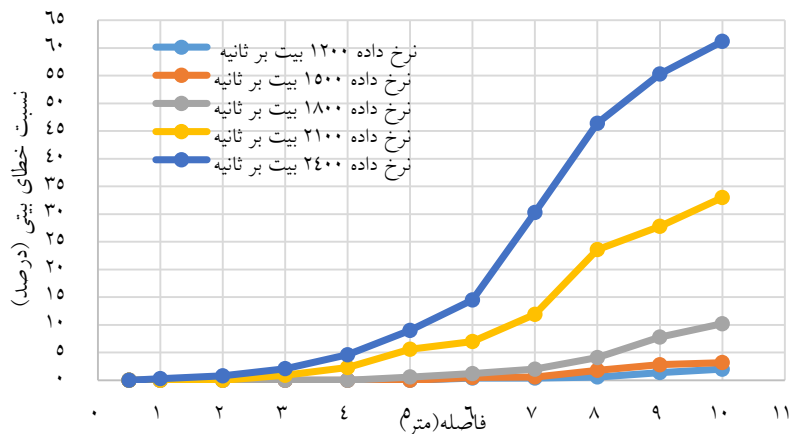
شکل ۵: ساختار شبکه طراحی شده. چهار گره و یک سرخوشه

#### ۵-۴ آزمایش عملکرد شبکه حسگر نوری طراحی شده در سطح سخت‌افزار

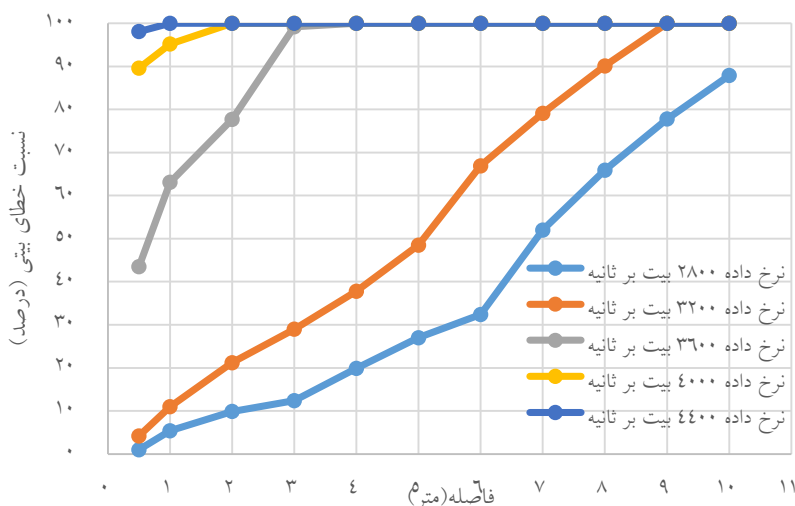
در این قسمت نتایج آزمایش عملکرد شبکه حسگر بی‌سیم نوری طراحی شده، ارائه و تحلیل می‌شود. پروتکل‌های ارتباطی و الگوریتم‌های کنترل شبکه به‌طور مستقیم از طریق رابط ISP بر روی سخت‌افزار پیاده‌سازی می‌شود. پروتکل دسترسی به رسانه VMAC پیاده‌سازی و روی سرخوشه و گره‌ها قرار داده شد. همچنین برای به دست آوردن پارامترهای سخت‌افزاری، دو گره به‌دلخواه انتخاب شد که یک گره به‌عنوان فرستنده و گره دیگر به‌عنوان گیرنده عمل می‌کند و آزمایش‌های مختلف روی آن‌ها انجام شد.

جدول ۳: BER نسبت به فاصله به ازای نرخ‌های مختلف داده

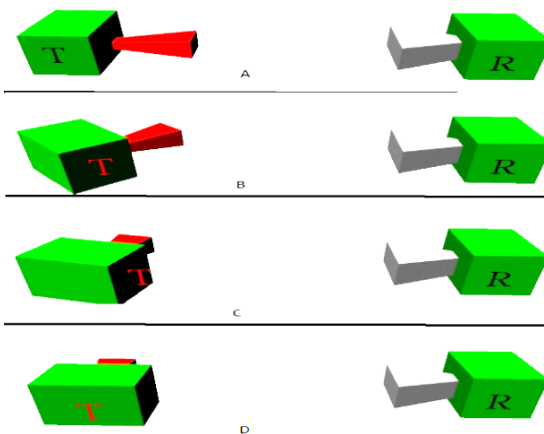
نرخ داده (بیت بر ثانیه) / فاصله (متر)	۰/۵	۱	۲	۳	۴	۵	۶	۷	۸	۹	۱۰
۳۰۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰
۶۰۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰
۱۲۰۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰/۴	۰/۴	۰/۶	۱/۴	۲
۱۵۰۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰/۵	۰/۶	۱/۸	۲/۸	۳/۲
۱۸۰۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰/۶	۱/۲	۲	۴/۱	۷/۸	۱۰/۲
۲۱۰۰	۰	۰	۰	۰/۹	۲/۳	۵/۶	۷	۱۱/۹	۲۳/۶	۲۷/۸	۳۳
۲۴۰۰	۰	۰/۳	۰/۸	۲/۱	۴/۶	۹	۱۴/۵	۳۰/۳	۴۶/۴	۵۵/۳	۶۱/۲
۲۸۰۰	۱	۵/۴	۹/۹	۱۲/۴	۱۹/۹	۲۷	۳۲/۴	۵۲	۶۵/۹	۷۷/۸	۸۷/۹
۳۲۰۰	۴/۲	۱۱	۲۱/۲	۲۹	۳۷/۸	۴۸/۵	۶۶/۹	۷۹/۱	۹۰/۱	۱۰۰	۱۰۰
۳۶۰۰	۴۲/۵	۶۳/۱	۷۷/۷	۹۹/۲	۱۰۰	۱۰۰	۱۰۰	۱۰۰	۱۰۰	۱۰۰	۱۰۰
۴۰۰۰	۸۹/۶	۹۵/۲	۱۰۰	۱۰۰	۱۰۰	۱۰۰	۱۰۰	۱۰۰	۱۰۰	۱۰۰	۱۰۰
۴۴۰۰	۹۸/۱	۱۰۰	۱۰۰	۱۰۰	۱۰۰	۱۰۰	۱۰۰	۱۰۰	۱۰۰	۱۰۰	۱۰۰
۴۸۰۰	۱۰۰	۱۰۰	۱۰۰	۱۰۰	۱۰۰	۱۰۰	۱۰۰	۱۰۰	۱۰۰	۱۰۰	۱۰۰



شکل ۶: نمودار BER نسبت به فاصله به ازای نرخ‌های مختلف داده



شکل ۷: نمودار درصد خطای بی‌تی نسبت به فاصله به ازای نرخ‌های مختلف داده



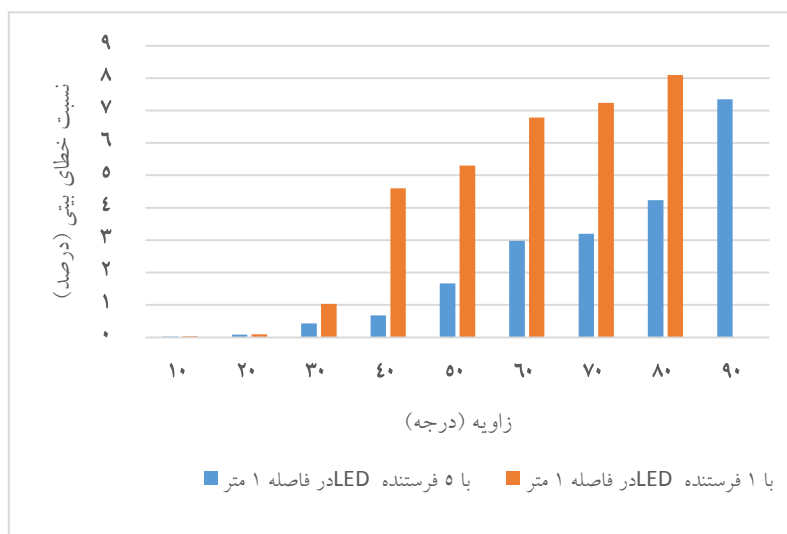
شکل ۸: تغییر زاویه فرستنده از ۰ تا ۹۰ درجه

#### ۴-۵ آزمایش دوم: تغییر زاویه بین فرستنده و گیرنده (غیر از خط دید<sup>۱۹</sup> (Non-LOS))

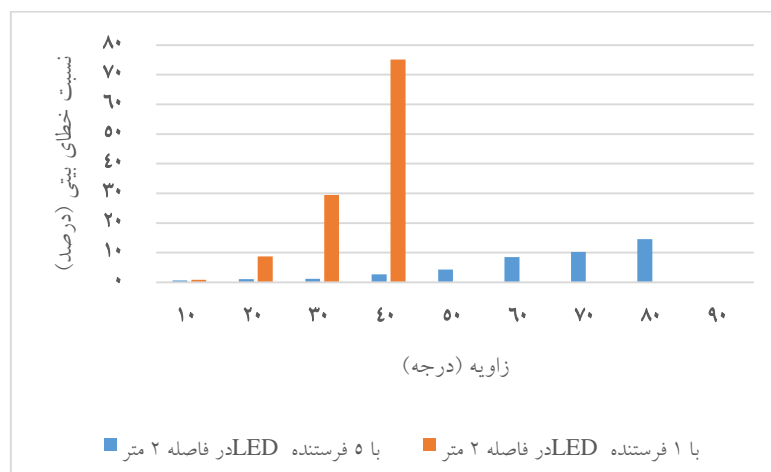
در این آزمایش فاصله بین فرستنده و گیرنده و همچنین نرخ ارسال داده ثابت است. اما زاویه ارسال فرستنده، از ده تا نود درجه تغییر می‌کند (شکل ۸). به ازای فاصله ۱،۲ و ۳ متر و نرخ داده ۳۲۰۰ بیت بر ثانیه آزمایش انجام شده است که نتایج در جدول ۴ و شکل‌های ۹ تا ۱۱ نشان داده شده است. در مدار فرستنده از ۱ و ۵ عدد LED به‌عنوان انتقال‌دهنده داده استفاده شده است. گیرنده به‌وسیله رابط سریال داده‌های دریافتی از گیرنده را به رایانه منتقل می‌کند تا تحلیل و بررسی شوند.

جدول ۴: خطای انتقال داده به ازای زوایای مختلف فرستنده

زاویه (درجه)	۱۰	۲۰	۳۰	۴۰	۵۰	۶۰	۷۰	۸۰	۹۰
نسبت خطای بی‌تی با ۵ فرستنده LED در فاصله ۱ متر	۰/۰۲۸۵	۰/۰۸۵	۰/۴۳	۰/۶۸	۱/۶۷	۲/۹۸	۳/۲	۴/۲۳	۷/۳۵
نسبت خطای بی‌تی با ۱ فرستنده LED در فاصله ۱ متر	۰/۰۳۵	۰/۰۹۳	۱/۰۳	۴/۶	۵/۳	۶/۷۸	۷/۲۴	۸/۱	بدون داده
نسبت خطای بی‌تی با ۵ فرستنده LED در فاصله ۲ متر	۰/۶۲۵	۱/۰۵	۱/۱۶	۲/۶۷	۴/۳۳	۸/۵۳	۱۰/۲۷	۱۴/۶۳	بدون داده
نسبت خطای بی‌تی با ۱ فرستنده LED در فاصله ۲ متر	۰/۱۸۵	۸/۷۲	۲۹/۴۸	۷۵/۰۸	بدون داده	بدون داده	بدون داده	بدون داده	بدون داده
نسبت خطای بی‌تی با ۵ فرستنده LED در فاصله ۳ متر	۰/۶۲	۶/۶۷	۷/۵۲	۸/۲۳	۱۰/۱۸۵	۱۳/۷۵	۱۶/۹۳	بدون داده	بدون داده
نسبت خطای بی‌تی با ۱ فرستنده LED در فاصله ۳ متر	۲/۶۹	۶/۸۴	بدون داده	بدون داده	بدون داده	بدون داده	بدون داده	بدون داده	بدون داده

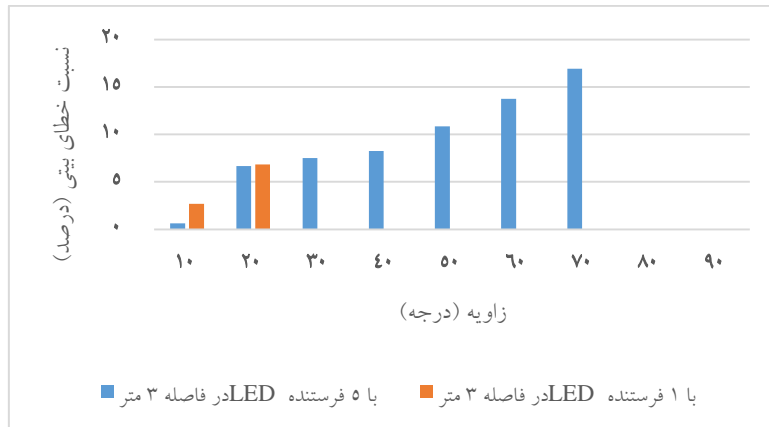


شکل ۹: نسبت خطای بی‌تی به زاویه با نرخ داده ۳۲۰۰ بیت بر ثانیه و فاصله ۱ متر



شکل ۱۰: نسبت خطای بی‌تی به زاویه با نرخ داده ۳۲۰۰ بیت بر ثانیه و فاصله ۲ متر





شکل ۱۱: نسبت خطای بی‌تی به زاویه با نرخ داده ۳۲۰۰ بیت بر ثانیه و فاصله ۳ متر

است که یک شبکه حسگر بی‌سیم پیاده‌سازی کردند که از لیزر برای انتقال داده استفاده کردند. پارامترهای سخت‌افزاری به دست آمده در آن پژوهش در جدول ۶ مشاهده می‌شود.

جدول ۶: پارامترهای سخت‌افزاری کار پژوهشی مبتنی بر لیزر در [۱۴]

سرعت کلاک میکروکنترلر	۸ مگاهرتز	بیشینه فاصله انتقال	۲ متر
نرخ داده	۱۰۰ کیلوبیت بر ثانیه	میزان LOS بودن	۱۰ درجه
توان فرستنده	۲/۶ میلی وات		

همان‌طور که از جداول ۵ و ۶ مشاهده می‌شود توان مصرفی کار پژوهشی مبتنی بر لیزر در مرجع [۱۴] از حسگر بی‌سیم طراحی شده در این پژوهش کمتر می‌باشد که از دلایل آن می‌توان به استفاده نکردن از مدار راه‌انداز و تنظیم‌کننده اشاره کرد. همچنین نرخ انتقال داده کار پژوهشی مبتنی بر لیزر در مرجع [۱۴] در محدوده ۱۰۰ کیلوبیت بر ثانیه است که نسبت به حسگر بی‌سیم طراحی شده در این پژوهش بیشتر است. دلیل آن محدود بودن نرخ انتقال داده فرستنده و ماژول گیرنده می‌باشد. در شبکه حسگر بی‌سیم طراحی شده در این پژوهش، محدوده انتقال تا ۲۱ متر است ولی در کار پژوهشی مبتنی بر لیزر در مرجع [۱۴] حداکثر محدوده انتقال تا دو متر است. شایان‌ذکر است که در شبکه‌های حسگر عملی و با کاربردهای صنعتی حسگرها حداقل ده متر از هم فاصله دارند. در کار پژوهشی مبتنی بر لیزر در مرجع [۱۴] در صورتی که فرستنده و گیرنده با هم ده درجه اختلاف داشته باشند داده منتقل می‌شود در صورتی که، حسگر بی‌سیم طراحی شده در این پژوهش قادر است تا نود درجه اختلاف بین فرستنده و گیرنده داده منتقل کند.

## ۶ نتیجه‌گیری

امروزه شبکه‌های حسگر بی‌سیم به‌عنوان یکی از ابزارهای مهم در تحقق اینترنت اشیا مورد توجه می‌باشند. در این مقاله یک شبکه حسگر بی‌سیم نوری ماژولار طراحی و ساخته شده است و همچنین یک پروتکل دسترسی به رسانه (VMAC) برای شبکه‌های حسگر بی‌سیم نوری پیشنهاد شده است. نتایج ارزیابی عملکردی شبکه حسگر نوری پیشنهادی، تأییدکننده عملکرد مناسب آن می‌باشد. بیشینه فاصله انتقال خط دید با نرخ ۳۰۰ و ۶۰۰ بیت بر ثانیه ۱۸ متر با خطای انتقال صفر درصد و ۲۱ متر با خطای انتقال ۱۰ درصد اندازه‌گیری شده است. انتقال داده غیر خط دید در فواصل ۱،۲ و ۳ متر با نرخ داده ۳۲۰۰ بیت بر ثانیه برای شبکه طراحی شده، اندازه‌گیری شده است. این ارتباط در فاصله ۱ متر با تغییر زاویه تا ۹۰ درجه با خطای انتقال ۷/۳۵ درصد داده منتقل می‌کند. در فاصله ۲ متر بیشینه زاویه انتقال ۸۰ درجه با خطای انتقال ۱۴/۶۳ درصد است و در فاصله ۳ متر بیشینه انتقال تا زاویه ۷۰ درجه با خطای انتقال ۱۶/۹۳ درصد اندازه‌گیری شده است. برای ادامه پژوهش در این زمینه، طراحی ارتباط

همان‌طور که از شکل‌های ۹ تا ۱۱ و جدول ۴ مشاهده می‌شود با افزایش زاویه فرستنده و نزدیک شدن به مقدار ۹۰ درجه، خطای انتقال داده بیشتر می‌شود. در فاصله ۱ متر با ۵ عدد LED، فرستنده تا ۹۰ درجه داده منتقل می‌کند و بیشترین خطای آن برابر ۷/۳۵ درصد است در حالی که در همین فاصله با ۱ عدد LED به‌عنوان فرستنده، داده با زاویه بیشینه ۸۰ درجه و با خطای ۸/۱ درصد منتقل می‌شود. همچنین در فاصله ۲ متری و با ۵ عدد LED، داده با زاویه بیشینه ۸۰ درجه و خطای ۱۴/۶۳ درصد و به ازای ۱ عدد LED، بیشینه نرخ انتقال داده تا ۴۰ درجه و خطای انتقال داده ۷۵/۰۸ درصد اندازه‌گیری شده است. در فاصله ۳ متری به ازای ۵ عدد و ۱ عدد LED، بیشینه نرخ انتقال داده تا ۷۰ و ۱۵ درجه با خطای انتقال داده ۱۶/۹۳ و ۶/۸۴ درصد به دست آمد.

## ۴-۵ آزمایش سوم: به دست آوردن پارامترهای سخت‌افزاری

در این آزمایش پارامترهای سخت‌افزاری به دست آمده است که در جدول ۵ خلاصه شده است. مقدار توان مصرفی برای فرستنده در حالت انتقال با ۵ عدد LED به‌عنوان فرستنده برابر ۰/۱۵ وات و با ۱ عدد LED به‌عنوان فرستنده برابر ۰/۱۱۵ وات و در حالت حسگری (هنگامی که داده ارسال نمی‌شود) برابر ۰/۰۷۵ وات است. توان مصرفی گیرنده ۰/۱۲ وات است.

جدول ۵: پارامترهای سخت‌افزاری

سرعت کلاک میکروکنترلر	۸ مگاهرتز	بیشینه فاصله انتقال	۲۱ متر
نوع مدولاسیون	کلید زنی روشن-خاموش	توان مصرفی در حالت انتقال	با ۰/۱۵ وات LED=۵ با ۰/۱۱ وات LED=۱
نرخ داده	۴/۴ کیلوبیت بر ثانیه	توان مصرفی فرستنده در حالت حسگری	۰/۰۷۵ وات
توان مصرفی گیرنده	۰/۱۲ وات	زاویه انتقال	۹۰ درجه

با توجه به ولتاژ تغذیه، مقدار توان می‌تواند کمتر شود اما چون از تنظیم‌کننده ۵ ولتی جهت محافظت از میکروکنترلر استفاده شده است ولتاژهای کمتر از ۵ نمی‌تواند ورودی باشد. در صورتی که میکروکنترلر می‌تواند با ولتاژ تغذیه ۲/۸ ولت نیز کار کند در این صورت مقدار توان نیز کمتر می‌شود.

در این پژوهش، از LED به‌عنوان فرستنده در شبکه حسگر بی‌سیم نوری استفاده شده است که در شبکه‌های حسگر مورد وجود ندارد. مقایسه نتایج این پژوهش با کار پژوهشی در مرجع [۱۴] مقایسه شده

- [17] Y. S. Kavian, *Intelligent Systems for Optical Networks Design: Advancing Techniques*, IGI Global, 2013.
- [18] A. Atmega128, "8-bit Microcontroller datasheet, 2003, USA, California: Atmel Corporation.
- [19] D. C. Daly and A. P. Chandrakasan, "An energy-efficient OOK transceiver for wireless sensor networks," *IEEE Journal of Solid-State Circuits*, vol. 42, pp. 1003-1011, 2007.
- [20] V. T. Semiconductor, "Photo modules for pcm remote control systems isop1738," Datasheet from: www.DatasheetCatalog.com, 2001.
- [21] C. C. Davis, I. I. Smolyaninov, and S. D. Milner, "Flexible optical wireless links and networks," *IEEE Communications Magazine*, vol. 41, pp. 51-57, 2003.
- [22] H.-k. Lee and S.-L. Kim, "Network coded ALOHA for wireless multihop networks," in *2009 IEEE Wireless Communications and Networking Conference*, 2009, pp. 1-5.
- [23] Y. S. Kavian and H. Rasouli, "Adaptive IEEE 802.15.4 MAC Protocol for Wireless Sensor Networks," *Technological Breakthroughs in Modern Wireless Sensor Applications*, p. 109, 2015.
- [۲۴] مهدی سبزواری و محمد نصیری، «روشی توزیع شده برای زمانبندی سلول در شبکه‌های بیسیم مبتنی بر 802.15.4e با هدف کاهش تأثیر پدیده کیفی»، *مجله مهندسی برق تبریز*، جلد ۴۶، شماره ۳، صفحه ۲۳۲-۲۲۲، ۱۳۹۵.
- [۲۵] معصومه واعظی و محمدعلی جبرئیل جمالی، «پروتکل مسیریابی جدید مبتنی بر کیفیت خدمات در شبکه‌های حسگر بی‌سیم با تحلیل سلسله مراتبی»، *مجله مهندسی برق تبریز*، جلد ۴۶، شماره ۲، صفحه ۳۶۷-۳۵۵، ۱۳۹۵.
- [26] A. Tahmasi, H. Hematkah, and Y. S. Kavian, "Visible light communication based optical link for data transmission in Wireless Sensor Networks," in *Communication Systems, Networks and Digital Signal Processing (CSNDSP), 2016 10th International Symposium on*, 2016, pp. 1-6.
- نور مرئی و طراحی پروتکل‌های رقابتی در شبکه حسگر بی‌سیم نوری پیشنهاد می‌شود.
- مراجع
- [1] H. R. Sharif and Y. S. Kavian, *Technological Breakthroughs in Modern Wireless Sensor Applications*, IGI Global, 2015.
- [2] M. Tarhani, Y. S. Kavian, and S. Siavoshi, "SEECH: Scalable energy efficient clustering hierarchy protocol in wireless sensor networks," *IEEE Sensors Journal*, vol. 14, pp. 3944-3954, 2014.
- [3] I. Bekmezci and F. Alagöz, "Energy efficient, delay sensitive, fault tolerant wireless sensor network for military monitoring," *International Journal of Distributed Sensor Networks*, vol. 5, pp. 729-747, 2009.
- [4] A. Khosravi and Y. S. Kavian, "Broadcast Gossip Ratio Consensus: Asynchronous Distributed Averaging in Strongly Connected Networks," *IEEE Transactions on Signal Processing*, vol. 65, pp. 119-129, 2017.
- [5] I. F. Akyildiz, T. Melodia, and K. R. Chowdhury, "A survey on wireless multimedia sensor networks," *Computer networks*, vol. 51, pp. 921-960, 2007.
- [6] A. Goldsmith, *Wireless communications*, Cambridge university press, 2005.
- [7] J. M. Kahn and J. R. Barry, "Wireless infrared communications," *Proceedings of the IEEE*, vol. 85, pp. 265-298, 1997.
- [8] L. Chevalier, S. Sahuguede, and A. Julien-Vergonjanne, "Optical Wireless Links as an Alternative to Radio-Frequency for Medical Body Area Networks," *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*, vol. 33, pp. 2002-2010, 2015.
- [9] Z. Ghassemlooy, W. Popoola, and S. Rajbhandari, *Optical wireless communications: system and channel modelling with Matlab®*, CRC Press, 2012.
- [10] A. C. Boucouvalas, "Challenges in optical wireless communications," *Optics and Photonics news*, vol. 16, pp. 36-39, 2005.
- [11] M. Kavehrad, "Sustainable energy-efficient wireless applications using light," *IEEE Communications Magazine*, vol. 48, pp. 66-73, 2010.
- [12] H. Elgala, R. Mesleh, and H. Haas, "Indoor optical wireless communication: potential and state-of-the-art," *IEEE Communications Magazine*, vol. 49, pp. 56-62, 2011.
- [13] S. Nakamura, S. Pearton, and G. Fasol, *The blue laser diode: the complete story*, Springer Science & Business Media, 2013.
- [14] N. Agrawal, S. D. Milner, and C. C. Davis, "Design and performance of a directional media access control protocol for optical wireless sensor networks," *Journal of Optical Communications and Networking*, vol. 6, pp. 215-224, 2014.
- [15] R. Xie, W.-H. Yang, and Y.-C. Kim, "Reconfigurable routing protocol for free space optical sensor networks," *Sensors*, vol. 12, pp. 4824-4845, 2012.
- [16] A. Desai and S. Milner, "Autonomous reconfiguration in free-space optical sensor networks," *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*, vol. 23, pp. 1556-1563, 2005.

زیرنویس‌ها

- 1 Wireless Sensor Network
- 2 Radio Frequency
- 3 Optical Wireless Communication
- 4 Infrared
- 5 Visible Light
- 6 Ultraviolet
- 7 Laser Diode
- 8 Light Emitted Diode
- 9 Intensity Modulation /Direct Detection
- 10 Bit Error Ratio
- 11 V-Media Access Control
- 12 Avalanche Photodiode
- 13 Cluster Head
- 14 Node
- 15 On-Off Keying
- 16 Line-of-Sight
- 17 Baud Rate
- 18 Bit Error Rate
- 19 Non-Line of Sight