

بررسی اثرات توابع هدف RPL در برداشت انرژی حسگرهای مجهز به ترموالکتريک

علی جوادی

دانشجوی دکتری، دانشکده مهندسی کامپیوتر، دانشگاه علم و صنعت ایران، تهران، ایران
پست الکترونیکی: javadi_ali@comp.iust.ac.ir

زهرا نادری رجه

دانشجوی کارشناسی ارشد، دانشکده مهندسی کامپیوتر، دانشگاه علم و صنعت ایران، تهران، ایران
پست الکترونیکی: zahra_naderi@comp.iust.ac.ir

امیر مهدی حسینی منزّه*

استادیار، دانشکده مهندسی کامپیوتر، دانشگاه علم و صنعت ایران، تهران، ایران
پست الکترونیکی: monazzah@iust.ac.ir

چکیده

شده است. به عنوان یک اقدام مؤثر در راستای تأمین انرژی و افزایش طول عمر باتری، از برداشتگرهای انرژی در گره‌های شبکه‌های حسگر بی‌سیم استفاده می‌شود. در این راستا، ما در گام اول، بررسی جامعی از پژوهش‌های پیشین در زمینه برداشتگرهای انرژی انجام داده‌ایم تا چالش‌ها و امکانات مرتبط با فناوری‌های مختلف را به دقت بررسی کنیم. سپس با در نظر گرفتن یک روش مناسب، یک بستر عملی را برای ارزیابی میزان انرژی برداشت شده از محیط ارائه داده و درک چالش‌های موجود در این مسیر را معرفی کرده، سپس نتایج ارزیابی‌ها را به دقت تحلیل و بررسی خواهیم کرد.

افزایش قابلیت اطمینان و بهره‌وری در شبکه‌های حسگر بی‌سیم نیازمند دقت در مدیریت مصرف انرژی است. همچنین حفظ انرژی مورد نیاز برای اجرای وظایف متعدد در شبکه‌های حسگر بی‌سیم، یکی از چالش‌های اساسی در تشکیل این شبکه‌ها محسوب می‌شود. با توجه به تحقیقات انجام شده، بخش مسیریابی و ارسال و دریافت بسته‌ها تا حدود ۵۵٪ از مصرف انرژی هر دستگاه در شبکه‌های حسگر بی‌سیم را به خود اختصاص می‌دهد. به منظور مدیریت مؤثر انرژی در شبکه‌های کم‌توان و کاهش اتلاف انرژی، پروتکل RPL به عنوان یک استاندارد مورد استفاده قرار گرفته است. از آنجا که توابع هدف در پروتکل RPL نقش حیاتی در مسیریابی ایفا می‌کنند، در بسیاری از تحقیقات پیشین از معیار انرژی مصرفی در توابع هدف به منظور بهینه‌سازی مصرف انرژی استفاده

کلید واژه‌ها: شبکه حسگر بی‌سیم، انرژی مصرفی، برداشتگر انرژی، مسیریابی، RPL

* نویسنده مسئول

۱. مقدمه

شبکه حسگر بی سیم^۱ (WSN) از گره‌های حسگر متعدد تشکیل شده است که به منظور نظارت بر ویژگی‌های مختلف طراحی شده‌اند. این شبکه‌ها به طور عموم در زمینه‌های متنوعی مانند شناسایی بلایا طبیعی، سیستم‌های مراقبت بهداشتی، کنترل ترافیک، امنیت ساختمان و سایر کاربردها به کار می‌روند. این دستگاه‌ها، از طریق بهره‌گیری از باتری به عنوان منبع اصلی انرژی به تأمین انرژی خود می‌پردازند.

با توجه به محدودیت انرژی در باتری‌ها، لازم است آن‌ها را به صورت دوره‌ای تعویض یا شارژ نمود تا از طول عمر مفید گره‌های حسگر اطمینان حاصل شود. به دلیل استقرار گسترده گره‌های حسگر در مکان‌هایی با مشکلات دسترسی، جایگزینی باتری‌ها ممکن است یک وظیفه دشوار و یا حتی غیرممکن باشد [۱].

در پژوهش‌های اخیر، استفاده از انرژی مصرفی در تابع هدف و همچنین بهره‌گیری از منابع انرژی محیطی به عنوان یک راهکار اساسی برای افزایش عمر مفید گره‌های حسگر بی سیم مطرح شده است، و تحقیقات گسترده‌ای در این زمینه در دست انجام است [۲، ۳، ۴، ۵، ۶].

در این پژوهش، تمرکز بر کاهش مصرف انرژی گره‌ها در شبکه‌های حسگر بی سیم با تأکید بر برداشت انرژی در محیط‌های داخلی است، در این پژوهش، به منظور انجام برداشت انرژی در محیط‌های داخلی، از برداشت‌گرهای ترموالکتریک استفاده گردید. از طریق ایجاد عدم توازن بار در شبکه در بازه‌های زمانی کوتاه، سعی کردیم تا یکی از گره‌های شبکه را به دمای بیشتری نسبت به سایر گره‌ها برسانیم. این اقدام به منظور بهره‌گیری از گرمای تولید شده در هر گره، و سپس ذخیره آن به عنوان انرژی قابل استفاده در باتری هر گره، انجام شد. در فرآیند اعتبارسنجی این پژوهش، از شبیه‌ساز Cooja و سیستم عامل Contiki بهره گرفتیم و همچنین تابع هدف آگاه از انرژی خود

را توسعه داده‌ایم. در این تابع هدف، میزان دمای هر نود محاسبه شده و با توجه به فرمول ترموالکتریک و بازدهی برداشتگر ترموالکتریک، مقدار انرژی تولید شده را به باتری گره افزودیم. نسبت به نسخه اولیه تابع هدف موجود در پروتکل RPL که از الگوریتم‌های MRHOF و OFO استفاده می‌کند راهکارهایی جهت کاهش در مصرف انرژی ارائه نمی‌دهد، توانستیم با بهبود تابع هدف، مصرف انرژی باتری هر نود را بهبود بخشیم که این بهبود باعث افزایش طول عمر کل شبکه شده است. زیرا، میزان انرژی باتری هر گره نسبت به حالت اولیه با نرخ پایین‌تری کاهش یافته است.

ساختار این پژوهش در ادامه به این صورت است که در فصل دوم این پژوهش، به بررسی مباحث اولیه مرتبط با اینترنت اشیا و چالش‌های آن پرداخته‌ایم. همچنین به بررسی پروتکل RPL و اجزای اصلی آن پرداختیم. در این بخش، انواع برداشتگرهای استفاده شده در شبکه‌های حسگر بی سیم را نیز مورد بررسی قرار داده و به تفصیل به بررسی برداشتگر ترموالکتریک پرداخته‌ایم. در فصل سوم، به بررسی پژوهش‌هایی که در این راستا انجام شده است پرداخته‌ایم. سپس در فصل چهارم، مشاهدات و ایده‌های پیشنهادی در این پژوهش را بررسی نمودیم. در فصل پنجم، نتایج به دست آمده از پژوهش را از دیدگاه‌های مختلف مورد ارزیابی قرار دادیم. در فصل ششم، به نتیجه‌گیری و بیان کارهای آتی پرداخته‌ایم.

۲. پیش‌نیازها

در حال حاضر، گره‌های حسگر بی سیم در انواع کاربردها از جمله برنامه‌های سلامت و دیگر حوزه‌ها با تنوع بالایی مورد استفاده قرار می‌گیرند. از جمله چالش‌های این نوع شبکه‌ها، استفاده از دستگاه‌ها با باتری محدود و برد انتقال کوتاه است بنابراین به علت کوتاه بودن عمر دستگاه‌ها طول عمر شبکه نیز کاهش می‌یابد؛ بنابراین حفظ انرژی لازم برای انجام وظایف در شبکه‌های

می‌توانند یک یا چند والد داشته باشند که این والدین وظیفه‌ی مسیریابی به سمت ریشه را بر عهده دارند [۷]. در پروتکل RPL، انتخاب بهترین والدین بر اساس یک تابع هدف انجام می‌شود که این تابع هدف برای انتخاب والد مناسب از مجموعه‌ای از معیارها بهره می‌برد. این معیارها ممکن است شامل معیارهای گره محور نظیر انرژی، فاصله تا گره مقصد، یا معیارهای مبتنی بر پیوند از قبیل تعداد انتقال مورد انتظار (ETX)^۶ و سطح کیفیت پیوند (LQL)^۷ باشند.

به صورت پیش فرض دو تابع هدف MRHOF و OF0 در زیرساخت RPL پیاده‌سازی شده است که به ترتیب با معیارهای ETX و HopCount عمل می‌کنند. با این حال، استفاده از یک معیار به صورت منفرد، همان‌طور که در توابع هدف استاندارد MRHOF^۸ و OF0^۹ پیاده‌سازی شده است، با محدودیت‌های زیادی همراه است [۷]. این به این معناست که برای تصمیم‌گیری فقط از یک معیار استفاده شود، شبکه فقط از یک جنبه بهبود پیدا می‌کند، اما ممکن است از سایر جهات دچار مشکل شود.

به‌عنوان مثال در یک الگوریتم تابع هدفی که مبتنی بر معیار کمترین مقدار تعداد انتقال مورد انتظار است، ممکن است این تابع هدف بهترین والد را برای یک گره انتخاب کند، این امر باعث مصرف انرژی بیشتر در گره می‌شود که برای گره‌ها با میزان انرژی کم مناسب نیست [۸].

جدول (۱): منابع برداشت انرژی و چگالی توان مربوط به آن‌ها [۱۵]

منبع انرژی	انواع	روش برداشت انرژی	تراکم قدرت
تابشی	خورشیدی	سلول‌های خورشیدی (در داخل ساختمان)	$<10\mu\text{W}/\text{cm}^2$
		سلول‌های خورشیدی (در فضای باز، روزهای آفتابی)	$15\text{mW}/\text{cm}^2$
رادیویی		تبدیل الکترومغناطیسی	$0.1\mu\text{W}/\text{cm}^2$ (GSM)
		تبدیل الکترومغناطیسی	$0.01\mu\text{W}/\text{cm}^2$ (WiFi)

6- Expected Transmission Count

7- Link Quality Level

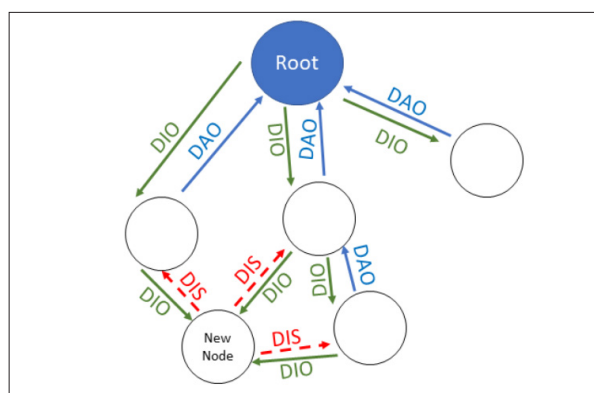
8- Minimum Rank With Hysteresis Objective Function

9- Objective Function Zero

حسگر بی‌سیم یکی از مهم‌ترین مسائل در تشکیل شبکه‌ها و صحت عملکرد این شبکه‌ها است.

۲-۱ شبکه ارتباطی زیرساخت

گره‌های شبکه حسگر بی‌سیم ملزم به همکاری جهت انتقال اطلاعات جمع‌آوری شده خود به گره ریشه هستند. این اطلاعات ممکن است از طریق چندین گره خارج از دامنه ارتباطی گره دریافت‌کننده اصلی منتقل شوند. برای حل این چالش، ضرورت استفاده از استانداردها به منظور برقراری ارتباط میان‌گره‌ها و مسیریابی صحیح بسته‌ها وجود دارد. یکی از چالش‌های مهم در شبکه‌های حسگر بی‌سیم، محدودیت منابع و استقرار گره‌ها در محیط‌های با سطح نویز بالاست. این محدودیت‌ها موجب نیاز به طراحی شبکه‌های کم‌مصرف و پراتالاف (LLN)^۲ می‌شود. این نوع شبکه‌ها نیازمند پروتکل‌های خاصی هستند که بر کارایی و مسیریابی داده‌ها با تمرکز بالا تمرکز کنند. به‌منظور پاسخگویی به این نیازها، IETF^۳ پروتکل استاندارد شده‌ای را برای شبکه‌های 6LoWPAN^۴ با نام RPL^۵ (پروتکل مسیریابی IPv6 برای شبکه‌های کم‌توان و پراتالاف) توسعه داده است.



شکل (۱): ساختار DODAG و پیام‌های کنترلی [۹]

پروتکل مسیریابی RPL به منظور مدیریت محدودیت‌های دستگاه‌های با منابع محدود طراحی شده است و توانایی سازگاری با تغییرات گره و شرایط ارتباطی در طول زمان را دارد. در شبکه‌های کم‌توان و پراتالاف (LLNs)، گره‌ها

2- Low-Power and Lossy Network

3- Internet Engineering Task Force

4- IPv6 over Low Power Wireless Personal Area Networks

5- IPv6 Routing Protocol for LLNs

اضافه می‌شود و قصد دارد به ساختار درختی DODAG متصل شود، ابتدا پیام DIS را به گره‌های اطراف خود ارسال می‌کند. پس از دریافت پیام DIS، همسایگان به گره جدید پاسخ می‌دهند و پیام DIO را به او ارسال می‌کنند. گره تازه وارد پس از دریافت چندین پیام DIO از گره‌های همسایه، با توجه به تابع هدف، بهترین والد برای خود را انتخاب می‌کند. اگر گره جدید پس از مدت زمان مشخص پیام DIO را دریافت نکند، مجدداً در بازه‌های زمانی مشخص پیام DIS را ارسال می‌کند تا به شبکه متصل شود.

۲-۲- برداشته‌های انرژی در شبکه‌های حسگر بی‌سیم یکی از راهکارهای اساسی برای افزایش عمر باتری در دستگاه‌های شبکه حسگر بی‌سیم استفاده از برداشته‌های انرژی از محیط است. در حال حاضر، فناوری‌های متنوعی برای برداشت انرژی از محیط در دسترس قرار گرفته‌اند، از جمله برداشته‌های انرژی خورشیدی، برداشته‌های انرژی گرمایی (ترموالکترونیک)، برداشته‌های انرژی تشعشعات محیطی، و برداشته‌های انرژی جریان سیال. در جدول ۱ اطلاعات مربوط به برداشته‌های مختلفی که در شبکه‌های حسگر بی‌سیم مورد استفاده قرار می‌گیرد را مشاهده می‌کنید. با توجه به جدول، در شرایط استفاده از شبکه در محیط داخلی استفاده از برداشته‌های انرژی خورشیدی به دلیل کارایی پایین توصیه نمی‌شود. همچنین در مورد برداشته‌های انرژی تشعشعات محیطی، به دلیل فاصله محل منابع انرژی بی‌سیم و محدودیت در اندازه آنتن برداشته‌گر، امکان برداشت انرژی از امواج رادیویی با فرکانس‌های موجود در فضا وجود ندارد [۱۰].

همچنین، برداشته‌های انرژی جریان سیال به دلیل عدم دسترسی به جریان سیال در محیط‌های داخلی، کارایی مورد نیاز را ندارند. با توجه به تحقیقات انجام شده در این پژوهش، تصمیم گرفته‌ایم به بررسی برداشته‌های انرژی گرمایی بپردازیم و با استفاده از روش پیشنهادی خود، تلاش کنیم میزان برداشت انرژی را افزایش داده و در نتیجه، عمر مفید شبکه را افزایش دهیم.

	تبدیل الکترومکانیکی	جریان سیال	$16.2\mu\text{W}/\text{cm}^2$
مکانیکی	پیزوالکتریک	نویز آکوستیک	$960\text{nW}/\text{cm}^2$
	پیزوالکتریک	حرکت / جنبش	$330\mu\text{W}/\text{cm}^2$
حرارتی	ترموالکترونیک	گرمای بدن	$40\mu\text{W}/\text{cm}^2$

همان‌طور که در (شکل ۱) مشاهده می‌کنید برای تشکیل یک شبکه DODAG^{۱۰} در شبکه‌های مبتنی بر RPL سه نوع پیام میان گره‌های شبکه جابه‌جا می‌شود که عبارتند از DIO^{۱۱}، DIS^{۱۲} و DAO^{۱۳} که در ادامه به صورت کلی به بررسی هر یک از آنها و روند تشکیل یک شبکه DODAG می‌پردازیم. برای شکل‌گیری شبکه، ابتدا گره ریشه بسته‌های DIO را به گره‌های همسایه خود ارسال می‌کند. سپس گره‌های همسایه، در صورت دریافت این پیام ACK را به گره ریشه ارسال می‌کنند.

گره‌هایی که به تازگی به ریشه متصل شده‌اند نیز پس از آن پیام DIO را به همسایگان خود ارسال می‌کنند. این فرایند تا جایی ادامه پیدا می‌کند که تمامی گره‌ها به شبکه متصل شوند و تمامی گره‌ها از طریق والدین خود در محدوده پوشش رادیویی گره ریشه قرار می‌گیرند.

در این سامانه، شبکه به منظور بهبود کارایی گره‌ها، مکانیزمی برای به‌روزرسانی مسیریابی در بازه‌های زمانی معین اجرا می‌کند. این به‌روزرسانی از طریق ارسال دوباره پیام‌های DIO انجام می‌شود. زمان اجرای این به‌روزرسانی توسط یک زمان‌بندی به نام "Trickle Timer" کنترل می‌شود. از این طریق می‌توان بازه‌های ارسال پیام‌های DIO را کوتاه‌تر و یا بلندتر کرد که از این طریق می‌توان والد‌های مناسب‌تری را در طول زمان انتخاب کرد.

در این شبکه، پیام DAO توسط گره‌ها به والدین خود ارسال می‌شود و در آن، اطلاعات مربوط به گره فرستنده به والدین منتقل می‌شود. زمانی که یک گره جدید به شبکه

10- Destination Oriented Directed Acyclic Graph

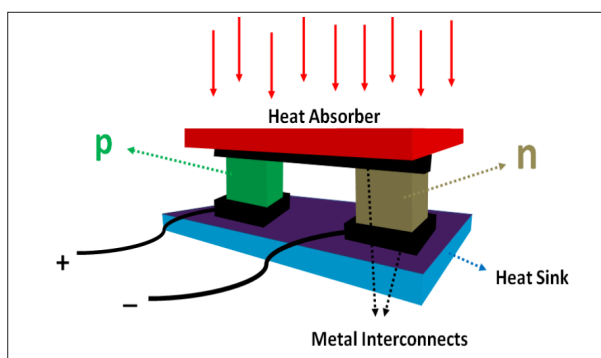
11- DODAG Information Object

12- DODAG Information Solicitation

13- Destination Advertisement Object

دهند و به عنوان یک راهکار پایدار برای تأمین انرژی مورد توجه باشند.

یک ماژول ترموالکتریک از دو صفحه تشکیل شده است که بین آن‌ها بلوک‌هایی واقع شده‌اند. هر بلوک از یک نیمه‌هادی از نوع p و یک نیمه‌هادی از نوع n تشکیل شده است (شکل ۲).



شکل (۲): برداشتگر انرژی گرمایی [۱۲].

ماژول‌های ترموالکتریک به این صورت عمل می‌کنند که اگر میان سطح سرد و گرم ترموالکتریک اختلاف دما وجود داشته باشد این اختلاف دما باعث ایجاد شار گرمایی در ماژول ترموالکتریک می‌شود. این شار الکتریکی با اختلاف دمای میان دو سطح رابطه مستقیمی دارد و اصل سیبک این پدیده را به تفصیل توضیح می‌دهد.

ضریب سیبک یک ویژگی مهم در ترموالکتریک است و نشان‌دهنده توانایی یک ماده در تولید جریان الکتریکی از اختلاف دما است. زمانی که اختلاف دما میان دو طرف یک مواد نیمه‌رسانا (مثل بیسموت، تلورید) ایجاد می‌شود، الکترون‌ها در این ماده به سمت طرف دمای بالاتر حرکت می‌کنند. ضریب سیبک مواد نیمه‌رسانا راهنمای خوبی برای انتخاب مواد در ساخت ماژول‌های ترموالکتریک فراهم می‌کند. مقادیر بالاتر این ضریب نشان‌دهنده کارایی بهتر در تبدیل انرژی حرارتی به الکتریکی هستند. معمولاً فلزاتی مانند بیسموت و تلورید دارای ضریب سیبک بالایی هستند و معمولاً در طراحی برداشتگرهای ترموالکتریک مورد استفاده قرار می‌گیرند. در شکل ۳

۳-۲- برداشتگرهای انرژی گرمایی (ترموالکتریک)

برداشتگرهای انرژی گرمایی، دستگاه‌هایی هستند که انرژی حاصل از تفاوت دما را به انرژی الکتریکی تبدیل می‌کنند. این برداشتگرها بر اساس اصل ترموالکتریک عمل می‌کنند. وقتی که یک جهت دما در یک جفت مواد مختلف تغییر می‌کند، یک شار الکتریکی ناشی از تفاوت دما ایجاد می‌شود.

ترموالکتریک‌ها از جفت مواد مختلفی که در واکنش به تغییر دما شار الکتریکی تولید می‌کنند، بهره می‌برند. این تکنولوژی برای برداشت انرژی از تفاوت‌های دمایی در محیط‌های مختلف، به ویژه در حوزه‌هایی که تغییرات دما قابل توجهی دارند، مورد استفاده قرار می‌گیرد.

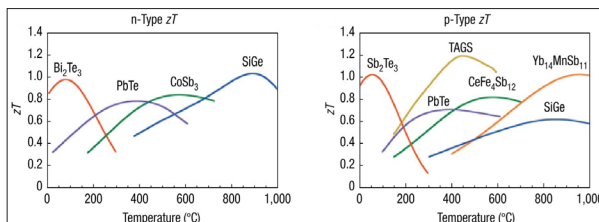
ترموالکتریک‌ها را می‌توان بر روی انواع مختلف بسترها مانند سیلیکون، پلیمرها و سرامیک‌ها ساخت. علاوه بر این، دستگاه‌های TEG (تبدیل‌کننده‌های ترموالکتریک) به عنوان برداشتگرهای انرژی گرمایی، مستقل از موقعیت هستند، دارای طول عمر طولانی می‌باشند و همچنین برای استفاده در دستگاه‌های حجیم و انعطاف‌پذیر مناسب می‌باشند [۱۱]. برداشتگرهای ترموالکتریک به دلیل راندمان تولید انرژی کمتر نسبت به برداشتگرهای خورشیدی و بادی، با چالش‌هایی روبه‌رو هستند. در مقایسه با برداشتگرهای خورشیدی که از تشعشعات خورشید برای تولید انرژی استفاده می‌کنند و برداشتگرهای سیال که از جریان هوا برای تولید انرژی بهره می‌برند، ترموالکتریک‌ها ممکن است عملکرد کمتری داشته باشند. با این حال، در محیط‌های داخلی که تغییرات دمایی حاصل از دستگاه‌های الکترونیکی وجود دارد، برداشتگرهای ترموالکتریک به عنوان یک گزینه مناسب برای برداشت انرژی محسوب می‌شوند. ترموالکتریک‌ها می‌توانند در محیط‌های محدود و با تفاوت‌های دمایی کوچک، به خصوص در ساختمان‌ها یا دستگاه‌های الکترونیکی، عملکرد بهتری از خود نشان

در پژوهش [۲] استفاده از دو معیار انرژی مصرفی و انرژی باقی مانده الگویی برای مصرف بهینه در بین گره‌ها ارائه شده است. در این پژوهش بر اساس میزان مصرف انرژی گره‌ها تا لحظه‌ی فعلی و همچنین بررسی انرژی باقی مانده‌ی هر گره، معیاری طراحی شده است که توسط آن طول عمر باقی مانده از هر گره در شبکه بررسی می‌شود. با ارزیابی طول عمر هر گره در شبکه می‌توان به وضعیت آن گره در شبکه پی برد. هرچه طول عمر یک گره در شبکه کم‌تر باشد احتمال خروج زودتر آن گره از شبکه نسبت به سایر گره‌ها بیشتر خواهد بود. با در نظر گرفتن گره با طول عمر کمتر تابع هدف طرح شده به گونه‌ای عمل می‌کند تا در ادامه‌ی روند اجرایی شبکه گره مدنظر کمتر با سایر گره‌ها در ارتباط باشد تا بتواند انرژی خود را ذخیره کند. این روند کاهش بار کاری گره تا زمانی ادامه پیدا می‌کند که طول عمر باقی مانده‌ی گره‌های اطراف بیشتر از این گره باشد و هر زمان که سایر گره‌های اطراف از نظر طول عمر کمتر یا مساوی با گره فعلی باشند تابع هدف مجدداً بار کاری گره را با سایر گره‌ها هم سطح می‌کند. به این ترتیب این گره در مقایسه با سایر گره‌ها به صورت متعادلی انرژی مصرف می‌کند.

در پژوهش [۳] هدف کاهش میزان مصرف انرژی و همچنین کاهش تأخیر ارسال بسته‌ها تا گره ریشه بوده است. به این منظور تابع هدف در این پژوهش از ترکیب دو معیار انرژی مصرفی و تأخیر برای انتخاب والدین استفاده می‌کند.

در پژوهش [۴] از معیار انرژی باقی مانده در تابع هدف استفاده شده است و گره‌ها برای انتخاب والدین خود گره‌هایی که بیشترین انرژی باقی مانده را دارند به عنوان والدین خود انتخاب می‌کنند. این تابع هدف با توجه به اینکه تنها از یک معیار استفاده می‌کند توانسته است طول عمر شبکه را افزایش دهد، رویکرد دیگری که پژوهشگران برای کاهش مصرف انرژی در پیش گرفته‌اند استفاده از برداشتگرهای انرژی است. در ادامه به برخی

می‌توانید مقایسه‌ای بین عناصر به کار رفته در ساخت انواع برداشتگرهای ترموالکتریک و دمای عملکرد بهینه هر کدام را مشاهده کنید.



شکل (۳): نمودار ضریب ZT برای نیمه هادی‌های مختلف نوع n و p [۱۳]

۳- پژوهش‌های پیشین

در این بخش قصد داریم به بررسی پژوهش‌های صورت گرفته در راستای بهبود پروتکل RPL از دیدگاه‌های مختلف بپردازیم. در ادامه به بررسی پژوهش‌های پیشین صورت گرفته در این حوزه و همچنین راهکارهای ارائه شده این پژوهش‌ها خواهیم پرداخت. در پژوهش‌های پیشین همواره به دو چالش اساسی در بهبود شبکه‌ی RPL پرداخته شده است. که این دو دغدغه شامل بهبود میزان مصرف انرژی و افزایش قابلیت اطمینان است. در پژوهش‌های صورت گرفته همواره از ترکیبی از معیارها برای بهینه‌سازی شبکه استفاده شده است. با توجه به اینکه اکثر دستگاه‌های متصل به شبکه‌ی اینترنت اشیاء از باتری استفاده می‌کنند و همچنین منابع انرژی محدودی دارند، توجه به میزان مصرف انرژی توسط گره‌ها از جمله مهم‌ترین دغدغه‌های پژوهشگران است. ارتباطات دستگاه‌ها با یکدیگر در مصرف انرژی بسیار تأثیرگذار است. هر دستگاهی که به میزان بیشتری با سایر دستگاه‌ها در ارتباط باشد مصرف انرژی آن در مقایسه با سایر دستگاه‌ها بیشتر خواهد بود. بنابراین لازم است تا نحوه‌ی ارتباط دستگاه‌ها با یکدیگر به گونه‌ای باشد که در آن به میزان انرژی هر دستگاه توجه شود. در این بخش به بررسی پژوهش‌هایی که سعی کرده‌اند از طریق بهینه‌سازی‌های مربوط به مسیریابی میزان مصرف انرژی را کاهش دهند پرداخته‌ایم.

بزرگ، به جز در مواردی که فرسوده توان رادیویی در نزدیکی سنسورها نصب شود، امکان پذیر نیست. حتی در این حالت نیز، قابلیت جابه‌جایی دستگاه به مکان‌های کوچک‌تر محدود شده و برای کاربردهایی همچون پایش سلامت بیماران مناسب نیست. استفاده از تکنولوژی برداشت انرژی سیال به دلیل ابعاد بزرگ این برداشتگرها، در بسیاری از کاربردها غیرممکن است. علاوه بر این، این برداشتگرها در شرایط استفاده در محیط‌های داخلی قابل استفاده نیستند.

در برخی از کاربردهای شبکه‌های حسگر بی‌سیم گره‌ها در محیط باز قرار دارند و به‌طور مستقیم از نور خورشید برخوردار می‌شوند. در این کاربردها می‌توان از پنل خورشیدی برای جذب انرژی تابشی خورشید و تبدیل آن به انرژی الکتریسیته استفاده کرد. در موارد بسیار دیگر، گره‌ها در دستگاه‌های پوشیدنی به کار می‌روند، و تماس این گره‌ها با بدن انسان، همچنین در نظر گرفتن اختلاف دمای سطح پوست با دمای هوا یا اختلاف دمای سطح مدارات با دمای هوا [۱۳]، می‌تواند به عنوان منبعی برای تولید انرژی توسط برداشتگرهای ترموالکتریک در نظر گرفته شود. به طور کلی، استفاده از برداشتگرهای انرژی در دستگاه‌های استفاده شده برای گره‌های حسگر بی‌سیم و در نظر گرفتن مقدار انرژی برداشت شده و مصرف شده توسط هر گره در توابع هدف، می‌تواند فرصت‌های جدیدی برای افزایش طول عمر شبکه در شرایط محیطی و کاربردهای متنوع ایجاد کند [۸].

با توجه به مطالب اشاره شده، در محیط‌های داخلی نیز به دلیل کارایی ناکافی برخی از برداشتگرها، انتخاب برداشتگرهای ترموالکتریک معقول به نظر می‌رسد. این نوع برداشتگرها، با وجود بازده کمتر نسبت به برداشتگرهای انرژی خورشیدی، در کاربردهای داخلی و دارای میزان جابه‌جایی بالا برای ما مفید محسوب می‌شوند.

یکی از کاربردهای حیاتی شبکه حسگر بی‌سیم، نظارت بر سلامت بیماران است. این سیستم مسئول مشاهده و

از پژوهش‌هایی که در آنها از تابع هدف آگاه به برداشتگر انرژی استفاده شده باشد اشاره می‌کنیم.

در پژوهش [۵] از تابع هدفی آگاه از برداشتگر انرژی خورشیدی استفاده شده است. پنل‌های خورشیدی می‌توانند انرژی را از محیط برداشت کرده و آن را در باتری دستگاه ذخیره کنند. گره‌ها می‌توانند از این انرژی خورشیدی جمع‌آوری شده برای تأمین انرژی عملیات خود استفاده کنند و وابستگی آن‌ها را به باتری را کاهش دهند. در این پژوهش برای مسیریابی، سطوح انرژی موجود در گره‌ها را در نظر گرفته‌اند. به این ترتیب، گره‌هایی با سطوح انرژی بالاتر به عنوان والدین ترجیح داده می‌شوند، این‌گونه می‌توان عدم تعادل انرژی در بین گره‌ها را کاهش داد و در نتیجه طول عمر شبکه را افزایش داد.

در پژوهش [۶] به افزایش قابلیت پردازشی گره‌ها با بهره‌گیری از تکنیک بارگذاری بر روی لایه مه تأکید شده است که در این پژوهش برای استفاده از قابلیت‌های یادگیری ماشین محققان ناچار به استفاده از برداشتگر انرژی شدند و در پژوهش معیار میزان انرژی برداشت شده را در کنار معیارهای دیگر مورد استفاده قرار دادند که این کار موجب کاهش مصرف انرژی و کاهش تأخیر محاسبات در شبکه شد.

۴- مشاهدات و ایده پیشنهادی

همان‌طور که در جدول ۱ مشاهده می‌شود در مواردی که امکان دسترسی به نور خورشید وجود ندارد برداشتگرهای انرژی خورشیدی بازدهی بسیار پایینی دارند، در چنین کاربردهایی جهت افزایش طول عمر باتری گره‌ها باید از برداشتگرهای دیگری استفاده نمود؛ از بین سایر تکنولوژی‌های برداشت انرژی، تکنولوژی جذب انرژی از امواج رادیویی به دلیل چگالی پایین این سیگنال‌ها در محیط و همچنین محدودیت در اندازه آنتن، معمولاً قابل استفاده نیست. این تکنولوژی به دلیل چگالی پایین امواج رادیویی و عدم امکان استفاده از آنتن با ابعاد

برای افزایش میزان برداشت انرژی در این گره‌ها و با استفاده از برداشتگر ترموالکتریک باید به اختلاف دما بیشتری نسبت به دمای هوا دست یافت؛ در صورتی که بتوان مسیر انتقال بسته‌ها را به نحوی تغییر داد که بسته‌های زیادی از طریق یک والد به گره ریشه منتقل شود باعث افزایش ناگهانی دما آن گره خواهد شد که این افزایش دما در فرایند برداشت انرژی گرمایی برای ما سودمند است؛ برای پیاده‌سازی این ایده، می‌توان در الگوریتم انتخاب والد، یک معیار جدید جهت میزان انرژی برداشت شده را به معیارهای موجود اضافه نمود. این معیار باعث می‌شود که الگوریتم به میزان بیشتری به افزایش دمای گره‌ها در شبکه در هر لحظه زمانی توجه کند. در این عملیات، اگر گره‌ها والد مشترک داشته باشند، آن‌ها ممکن است با همکاری از طریق ارسال بسته‌ها جهت مسیریابی به آن گره، به دمای آن گره افزوده و سعی در به حداکثر رساندن دمای آن گره داشته باشند. پس از گذشت یک بازه زمانی معین و کسب کارایی برداشت انرژی به حداکثر میزان خود، گره والد، ویژگی والد بودن را از دست می‌دهد. سپس فرزندان آن گره، بسته‌ها را از یک مسیر جایگزین برای ارسال به گره ریشه انتخاب می‌کنند. در نهایت، الگوریتم انتخاب والد به دنبال گره جدیدی می‌گردد که بتواند دمای آن را افزایش دهد.

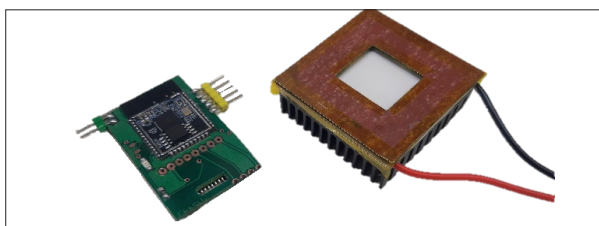
در نتیجه بتواند از طریق اختلاف دما میزان انرژی بیشتری را برداشت کند. توان مصرفی میانگین کل شبکه تحت تأثیر انجام این عملیات قرار نمی‌گیرد و تنها در لحظاتی کوتاه توان شبکه را به‌منظور افزایش میزان انرژی برداشت شده تغییر می‌دهد. برای بررسی زمان موردنیاز جهت افزایش دمای یک گره از طریق مسیریابی بسته‌ها، چند آزمایش عملی اجرا شده است که در ادامه نحوه اجرا و نتایج به‌دست آمده از آن‌ها را بررسی خواهیم کرد. جهت اجرای این آزمایش، نیاز به یک سیستم جهت اندازه‌گیری دمای سطح گرم و سطح سرد مازول ترموالکتریک و یک پردازشگر با بار کاری قابل تنظیم و مشخص داریم.

در این سناریو آزمایشی، از پردازشگر ESP32 استفاده

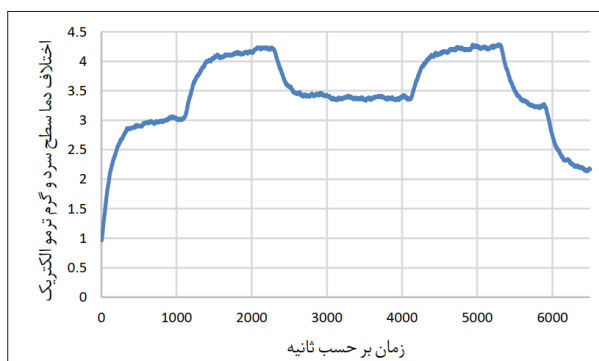
ارزیابی علائم حیاتی بیماران است و بنا به کاربرد این گره‌ها باید بر روی بدن انسان نصب شوند. این گره‌ها قادرند داده‌های ضروری مانند ضربان قلب، سطح اکسیژن خون، دما و سایر پارامترهای حیاتی را از تماس با بدن انسان اندازه‌گیری نمایند. یکی از چالش‌های اساسی در این گره‌های نظارت بر سلامت بیمار، طول عمر باتری آن‌هاست. این مسئله به ویژه در طول شب اهمیت بیشتری پیدا می‌کند، زیرا امکان تعویض باتری برای کاربر عموماً دشوار است.

با توجه به بررسی‌های انجام شده در بخش سوم، استفاده از برداشتگرهای انرژی ترموالکتریک در این کاربرد می‌تواند سودمند باشد. به این ترتیب، با برقراری تماس سطح گرم مولد با پوست انسان یا سطح مدار و به کمک یک انتقال دهنده حرارتی (برای افزایش تبادل حرارت با هوا)، این برداشتگرها توان کافی برای نگه‌داشتن دستگاه در وضعیت روشن را فراهم می‌کنند و همچنین توان مازاد را در باتری ذخیره می‌کنند. همان‌طور که قبلاً اشاره شده، یکی از کاربردهای این مولدها در حوزه مدارات الکترونیکی، به‌ویژه در شبکه‌های حسگر بی‌سیم است. در واقع، تمامی مدارات استفاده شده در این شبکه‌ها برای ارتباط از یک مازول مخابراتی ارسال و دریافت‌کننده بهره می‌برند. در طول عملکرد، مدارات الکترونیکی بخش قابل توجهی از انرژی مصرفی خود را به گرما تبدیل می‌کنند که این امر باعث افزایش دما در سطح این قطعات می‌شود. افزایش دما به‌ویژه در پردازنده و واحد ارسال‌کننده داده بی‌سیم قابل توجه است. در صورت اتصال سطح گرم مولد ترموالکتریک با بخش‌های گرم مدار، می‌توان بخشی از انرژی اتلافی را به‌صورت گرما بازیابی کرد. این اقدام نه‌تنها به بهینه‌سازی مصرف انرژی کمک می‌کند؛ بلکه باعث افزایش طول عمر باتری دستگاه نیز می‌شود. مهم‌تر از همه، این روش باعث افزایش کارایی انرژی مصرفی مدارات الکترونیکی می‌شود. به این ترتیب، این تکنولوژی در بسیاری از حوزه‌ها قابل استفاده است.

برای بهبود تبادل حرارت با هوا در سیستم استفاده شده است) بهره بردیم. خمیر سیلیکون نیز در اتصال ترموالکتریک و گرماگیر به منظور افزایش تبادل حرارت به کار رفته است. استفاده از محیط آزمایش تهیه شده (شکل ۵) و تحلیل نمودارهای حاصل از اعمال حالت‌های مختلف بار کاری بر روی ESP32، منجر به به دست آوردن نمودار اختلاف دمای سطح سرد و گرم (نمایش داده شده در شکل ۶) شد.



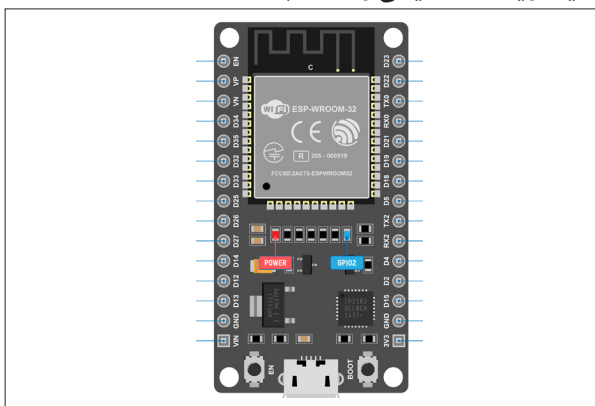
شکل (۵): محیط آزمایش طراحی شده



شکل (۶): تغییرات اختلاف دمای سطح سرد و گرم ماژول ترموالکتریک در آزمایش انجام شده بر حسب جدول ۲

همان‌طور که در شکل ۶ مشاهده می‌شود، در حالتی که یک گره حداقل توسط دو گره دیگر به‌عنوان والد انتخاب می‌شود، دمای بخش میکروکنترلر و فرستنده آن افزایش می‌یابد. این افزایش دما منجر به افزایش اختلاف حرارتی با سطح سرد ماژول ترموالکتریک می‌شود (با در نظر گرفتن انتقال حرارت از سطح گرم ماژول به سمت سرد آن) و به حدود ۴,۵ درجه سانتی‌گراد می‌رسد. این اختلاف دما نسبت مستقیمی با میزان انرژی برداشت شده توسط ماژول ترموالکتریک دارد. این آزمایش در شرایط آزمایشگاهی بدون وجود جریان هوا انجام شده است، از آنجایی که معمولاً در کاربردهای مورد استفاده جریان هوا به دلایل مختلفی وجود دارد، در صورتی که بتوان بر روی گرماگیر از جریان هوا بهره‌گیری کرد

شده است که جهت دستیابی به مصرف انرژی بهینه با فرکانس ۸۰ مگاهرتز عمل می‌کند و توانایی ارتقاء سرعت خود تا فرکانس ۲۴۰ مگاهرتز را دارا است. این نوع میکروکنترلر همچنین دارای فرستنده گیرنده ۲,۴ گیگاهرتزی برای اتصال به WiFi می‌باشند و از قابلیت بلوتوث کم‌مصرف (BLE) نیز پشتیبانی می‌کنند. در این آزمایش، از برد WROOM32 (شکل ۴) استفاده شده است که دارای یک روکش آلومینیومی بر روی خود است. این روکش آلومینیومی به منظور کاهش تأثیر نویزهای محیطی و انتقال بهتر حرارت است.



شکل (۴): WROOM32 [۱۴]

در این آزمایش، با حذف روکش آلومینیومی، امکان انتقال حرارت از سطح مدار به ماژول ترموالکتریک افزایش داده شده است. همچنین، برای افزایش کارایی انتقال حرارت، از خمیر سیلیکون در محل اتصال استفاده شده که این خمیر دارای خاصیت انتقال حرارتی بسیار بالایی است و به‌طور موثر از طریق این واسطه انتقال حرارت انجام می‌یابد. همچنین، بار کاری مرتبط با آزمایش در جدول ۲ نمایش داده شده است.

در حین آزمایش، پردازشگر به‌عنوان مشتری به یک نقطه دسترسی اصلی متصل است. برای این آزمایش، میانگین نرخ تولید و انتقال داده به‌اندازه ۴۸ بایت در هر ۵ ثانیه در نظر گرفته شده است و دو گره بسته‌هایشان را به منظور مسیریابی، به‌گروه مورد آزمایش ارسال می‌کنند. برای ارزیابی کارایی ماژول ترموالکتریک در هر وضعیت، از دمای سطح گرم ماژول (که با بخش فرستنده و میکروکنترلر در تماس است) و دمای سطح سرد ترموالکتریک (که از یک گرماگیر

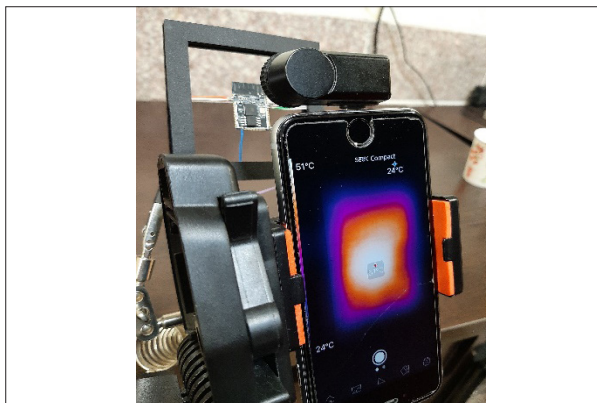
می‌رسد. بنابراین، دمای مدنظر در الگوریتم پیشنهادی، به عنوان حداکثر دمای مشاهده شده در حالت تجربی، بسیار کمتر از حداکثر دمای تضمین شده توسط تولیدکنندگان است. این نکته تضمین می‌کند که الگوریتم پیشنهادی به‌طور قابل اعتماد در شرایط کارکرد بدون خطا عمل خواهد کرد.

۵- ارزیابی و نتایج

در این بخش، به ارزیابی نتایج شبیه‌سازی‌های انجام شده می‌پردازیم. همان‌طور که از محیط آزمایش نشان داده شده در شکل ۷ و نتایج به‌دست‌آمده مشخص است، با توجه به انتقال حرارت ایجاد شده توسط میکروکنترلر به ترموالکترونیک و سایر اجزا در مدار، زمان لازم برای گرم شدن همه اجزا به‌به منظور بررسی دقیق‌تر، ما اقدام به شبیه‌سازی سناریوهای معتبر با استفاده از شبیه‌ساز Cooja نمودیم. جهت اطلاعات بیشتر، مشخصات محیط شبیه‌سازی در جدول ۳ آورده شده است.

جدول (۳): پارامترهای شبیه‌سازی

پارامتر	مقدار
شبیه‌ساز شبکه	Cooja under Contiki OS
مدل دستگاه	ESP32 (در Cooja Mote)
تعداد گره‌ها	۴۰
تعداد گره مقصد	۱
مساحت شبیه‌سازی	۱۰۰ متر * ۱۰۰ متر
زمان شبیه‌سازی	۶۰ دقیقه
نرخ ارسال بسته‌ها	۱۵ ثانیه
محدوده رادیویی ارسال بسته‌ها	۲۰ متر
محدوده رادیویی تداخل بسته‌ها	۲۵ متر



شکل (۷): محیط آزمایش طراحی شده بر اساس تصویربرداری گرمایی

میزان اختلاف دما و به‌تبع آن میزان انرژی برداشت شده افزایش پیدا می‌کند.

با توجه به اینکه اختلاف دمای ۴,۵ درجه می‌تواند توان الکتریکی برابر با ۰,۰۰۷ وات را تولید کند [۱۱] این میزان جریان برای روشن نگاه‌داشتن ESP32 در حالت کم‌مصرف کافی است، میکروکنترلر در حالت کم‌مصرف فعلی با مصرف ۱۰ میکروآمپر در ولتاژ ۳,۳ ولت عمل می‌کند که معادل ۳۳ میکرووات توان است. به همین دلیل، قادر است مدت‌زمان زیادی با استفاده از انرژی برداشت شده، فعال باقی بماند و همچنین انرژی اضافی را جهت مصرف آینده درون باتری خود ذخیره کند. در الگوریتم پیشنهادی برای انتخاب والد، پارامترهایی همچون HopCount، دمای گره‌کاندید والد، تعداد فرزندان گره‌کاندید والد، و بار کاری گره به عنوان معیارهای انتخاب والد در نظر گرفته خواهند شد. این پارامترها، به عنوان پارامترهایی که در الگوریتم‌های مسیریابی مبتنی بر RPL در طول عملکرد شبکه بین گره‌ها به اشتراک گذاشته می‌شوند، عمل خواهند کرد.

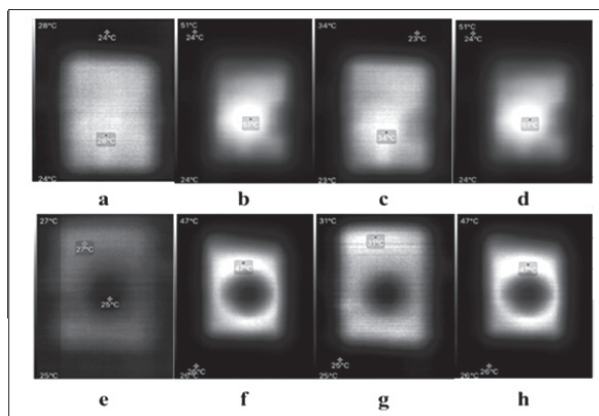
لازم به توضیح است که در صورت عدم اعمال یک قید برای حداکثر بار کاری (که به تعداد حداکثر فرزندان مرتبط است) در سامانه، ممکن است با افزایش تعداد فرزندان یک گره، نرخ از دست دادن بسته‌ها و تأخیر شبکه افزایش یابد؛ بنابراین، الگوریتم پیشنهادی حاوی یک مقدار معین برای حداکثر بار کاری برای هر گره است که مجاز به تخطی از آن نیستیم.

در نهایت، لازم به توضیح است که گرم شدن دستگاه به هیچ وجه باعث ایجاد خطاهای گذرا در سیستم نمی‌شود و کارایی سیستم را کاهش نمی‌دهد. در واقع با توجه به اینکه مقدار حداکثر گرم‌شدن گره‌ها به‌صورت تجربی به مقدار ۵۱ درجه محدود شده است، دمای گره‌ها همواره در یک محدوده مجاز باقی می‌ماند. به عنوان مثال، شرکت Espressif میکروکنترلرهای ESP32 را برای عملکرد بدون خطا تا دمای ۸۵ درجه سانتی‌گراد تضمین کرده است و حتی در بعضی مدل‌های خاص، دمای حداکثر به ۱۲۵ درجه سانتی‌گراد نیز

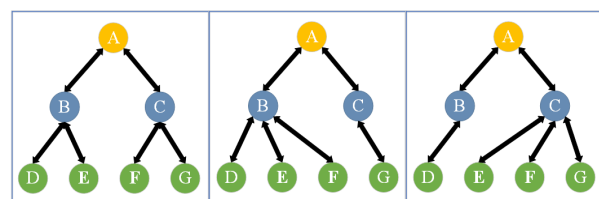
نقطه منفی محسوب می‌شود. همچنین، مشاهده می‌شود که برخی از گره‌ها در نزدیکی گره مقصد، در طول شبیه‌سازی به عنوان گره سطح ۱ انتخاب نشده‌اند و به همین دلیل دمای بسیار پایینی دارند.

این وضعیت نشان‌دهنده عدم توزیع مناسب بار در شبکه است و می‌تواند منجر به کاهش چشمگیر در طول عمر گره‌ها با سطح بالا گردد. در صورتی که دما به عنوان معیاری در الگوریتم انتخاب والد در نظر گرفته شود، مشکلات مطرح شده حل خواهند شد.

در شکل ۱۱، نمودار هیستوگرام برای سه الگوریتم انتخاب والد MRHOF، OFO، و REFER آورده شده است. همان‌طور که مشاهده می‌شود، در الگوریتم OFO نسبت به الگوریتم MRHOF، گره‌های شبکه دمای کمتری دارند و توزیع دما بهتر صورت گرفته است. در الگوریتم REFER نیز تفاوت میان دمای گره‌ها بیشتر مشهود است. میانگین دمای گره‌ها در الگوریتم OFO برابر با ۳۶،۹۴۱ درجه، در الگوریتم MRHOF برابر با ۳۷،۲۹۱ درجه، و در الگوریتم REFER برابر با ۳۷،۰۹۳ درجه است.

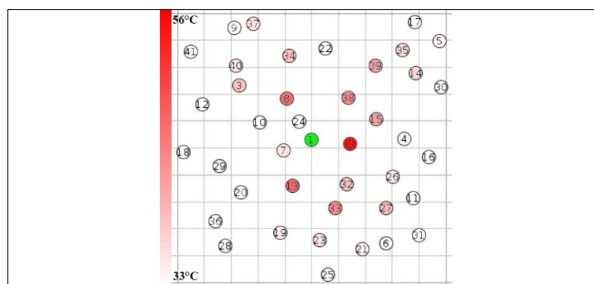


شکل (۱۲): نتایج به‌دست آمده از تصویربرداری گرمای گره

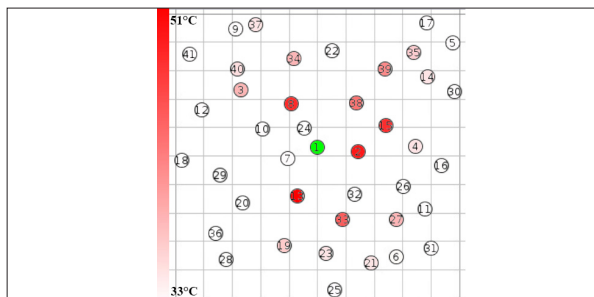


شکل (۱۳): تغییر سناریو شبکه در طول زمان

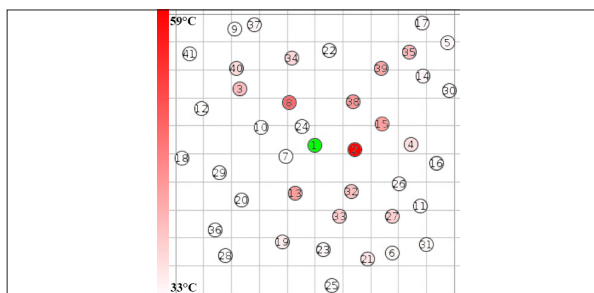
با توجه به پارامترهای ذکر شده، شبیه‌سازی برای سه الگوریتم انتخاب والد MRHOF، OFO، و REFER انجام و در هر شبیه‌سازی، با محاسبه زمان فعالیت رادیو و حجم داده‌های ارسالی، دمای هر گره را محاسبه کردیم. نتایج به‌دست آمده برای سه الگوریتم گفته شده به ترتیب در شکل‌های ۸، ۹ و ۱۰ قابل مشاهده هستند.



شکل (۸): نتایج شبیه‌سازی در الگوریتم MRHOF



شکل (۹): نتایج شبیه‌سازی در الگوریتم OFO



شکل (۱۰): نتایج شبیه‌سازی در الگوریتم REFER

همان‌طور که در شکل‌های ۸، ۹ و ۱۰ مشخص است، الگوریتم OFO نسبت به الگوریتم MRHOF، توزیع دماهای بهتری دارد، و دمای حداکثر گره‌ها به نسبت الگوریتم MRHOF کمتر است. به علاوه، الگوریتم REFER در مقایسه با دو الگوریتم دیگر، میانگین دمای کمتری در گره‌ها نشان می‌دهد. همچنین در هر سه شبیه‌سازی، مشاهده می‌شود که برخی از گره‌ها، با وجود والد بودن، دمای عملکردی مناسب برای برداشت انرژی گرمایی ندارند، که این موضوع در صورت استفاده از برداشتگرهای ترموالکتریک

صورتی که ترموالکتریک با ابعاد مناسب و بازدهی بالا به میکروکنترلر اضافه شود، می‌توان انتظار داشت که بازدهی بسیار بالایی در مبحث برداشت انرژی برای این کاربرد داشته باشیم.

۶- نتیجه‌گیری و کارهای آینده

با توجه به تحقیقات و آزمایش‌های انجام شده، نتایج به‌دست آمده نشان می‌دهد که اعتبارسنجی گره‌ها بر اساس میزان انرژی برداشت شده توسط برداشتگرهای ترموالکتریک، به‌ویژه در شرایطی که امکان دسترسی به نور خورشید وجود ندارد، به نحو قابل‌توجهی می‌تواند مفید باشد. این رویکرد حتی قابلیت بهبود سیستم‌هایی که به نور خورشید دسترسی دارند را نیز داراست.

۷- مراجع

- [1] A.Iftikhar, H.Lim Meng, M.Abdelrhman, I.Syed Asad, M.S.Leong, "Scopes, challenges and approaches of energy harvesting for wireless sensor nodes in machine condition monitoring systems: A review," *Measurement*, vol. 183, no. 0263-2241, p. 109856, 2021
- [2] Shakya, Nikesh Man and Mani, Mehdi and Crespi, Noel, "SEEOF: Smart energy efficient objective function: Adapting RPL objective function to enable an IPv6 meshed topology solution for battery operated smart meters," in 2017 Global Internet of Things Summit (GIoTS), IEEE, 2017, pp. 1-6
- [3] "Pedal: power-delay product objective function for internet of things applications," in Safaei, Bardia and Salehi, Ali Asghar Mohammad and Shirbeigi, Maryam and Monazzah, Amir Mahdi Hosseini and Ejlali, Alireza, 2019, pp. 892-895.
- [4] Mortazavi, Farzaneh and Khansari, Mohammad, "An energy-aware RPL routing protocol for internet of multimedia things," in Proceedings of the international conference on smart cities and internet of things, 2018, pp. 1-6.
- [5] Basaloom, Abdullah Ahmed S and Habaebi, Mohamed Hadi and Khan, Sheroz and Shaikh, Faraz Ahmed, "Increasing RPL-based LLN Lifespan using Harvested Solar Energy," in 2019 IEEE International Conference on Smart Instrumentation, Measurement and Application (ICSIMA), IEEE, 2019, pp. 1-6
- [6] Min, Minghui and Xiao, Liang and Chen, Ye and Cheng, Peng and Wu, Di and Zhuang, Weihua, "Learning-based computation offloading for IoT devices with energy harvesting," *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, pp. 1930-1941, 2019
- [7] H.Lamaazi, N.Benamar, J.Jara, "RPL-based networks in static and mobile environment: A performance assessment

همان‌طور که در شکل ۱۲ مشاهده می‌شود، اختلاف دما بین حالتی که دستگاه دارای یک فرزند است و حالتی که دستگاه دارای سه فرزند باشد، در سطح میکروکنترلر به ۱۷ درجه سانتی‌گراد می‌رسد. این مقدار نمایانگر تأثیر قابل توجه تعداد فرزندان در افزایش دمای والد است. لازم به توضیح است که تصاویر a, b, c و d مربوط به سطح بالایی میکروکنترلر هستند، و تصاویر e, f, g و h مربوط به سطح زیرین ESP32 می‌باشند. در ستون اول، حالت رادیو روشن بدون ارسال یا دریافت اطلاعات را مشاهده می‌کنید. در ستون دوم و چهارم، حالتی که گره دارای سه فرزند است قابل مشاهده است، و در ستون سوم، حالتی که گره دارای یک فرزند است، نمایان است.

برای درک بهتر از امکان‌پذیری برداشت انرژی توسط برداشتگر ترموالکتریک، سناریوهای شکل ۱۳ را در نظر بگیرید. در این سناریوها، شبکه از ۷ گره تشکیل شده است که یکی از آنها (A) گره ریشه است و دو گره میانی (B و C) و چهار گره برگ (D, E, F, G) وجود دارند. اگر شبکه در طول زمان به‌صورت متوازن عمل کند، میزان گرمای گره‌های میانی به میزان مطلوب برای برداشت انرژی ترموالکتریک نمی‌رسد؛ به عبارت دیگر، متوازن بودن شبکه باعث عدم بهره‌مندی بهینه از انرژی ترموالکتریک می‌شود. ولی در صورتی که در بازه‌های زمانی خاص بار کاری یک والد با افزایش تعداد فرزندان زیاد شود (همانند شکل ۱۳-الف یا ۱۳-ب)، میزان انرژی برداشت شده در طول زمان، علی‌رغم ثابت ماندن میزان مصرف شبکه و توازن مصرف باتری، افزایش می‌یابد. به‌عنوان مثال، با در نظر گرفتن بار کاری سه فرزند برای گره دارای برداشتگر ترموالکتریک و ایجاد اختلاف دمای ۱۷ درجه سانتی‌گراد که در آزمایش قبل مشاهده گردید، در هر یک از این دو سناریوی (شکل ۱۳-الف و ۱۳-ب) می‌توان انرژی قابل‌توجهی به دست آورد. برای محاسبه میزان انرژی برداشت شده، می‌توان از روابط ترمودینامیک و رابطه سیبک بهره گرفت. در

- common applications,” *Energy Reports*, vol. 6, pp. 264-287, 2020.
- [12] Rafiee, M., A. Siadatan, E. Afjei, and E. Zarei Ali Abadi. “Improving the efficiency of thermal power plant using thermoelectric material.” In 2012 4th International Conference on Intelligent and Advanced Systems (ICIAS2012), vol. 1, pp. 450-454. IEEE, 2012.
- [13] Snyder, G., Toberer, E. Complex thermoelectric materials. *Nature Mater* 7, 105–114 (2008). <https://doi.org/10.1038/nmat2090>
- [14] www.circuitstate.com/esp32-wroom-32_datasheet_en.pdf.
- [15] K.Adu-Manu, N.Adam, C.Tapparello, H.Ayatollahi, “Energy-harvesting wireless sensor networks (EH-WSNs): A review,” *ACM Transactions on Sensor Networks*, vol. 14, pp. 1-50, 2019.
- analysis,” *Journal of King Saud University - Computer and Information Sciences*, vol. 20, no. 3, pp. 320-333, 2017.
- [8] S. R. Lalani, A. A. M. Salehi, H. Taghizadeh, B. Safaei, A. M. H. Monazzah, A. Ejlali, “REFER: A Reliable and Energy-Efficient RPL for Mobile IoT Applications,” 2020 CSI/CPSSI International Symposium on Real-Time and Embedded Systems and Technologies (RTEST), pp. 1-8, 2020.
- [9] Azzedin, Farag, and Hussah Albinali. “Security in internet of things: Rpl attacks taxonomy.” In The 5th International Conference on Future Networks & Distributed Systems, pp. 820-825. 2021.
- [10] Y. Luo, L. Pu, “Practical Issues of RF Energy Harvest and Data Transmission in Renewable Radio Energy Powered IoT,” *IEEE Transactions on Sustainable Computing*, 2020.
- [11] NesrineJaziri, AydaBoughamoura, JensMüller, Brahim-Mezghani, FaresTounsi, MohammedIsmail, “A comprehensive review ofThermoelectric Generators: Technologies and