

## استفاده از قابلیت اطمینان نسبی برای افزایش طول عمر شبکه‌های حسگر بی سیم

عباسعلی رضائی<sup>۱</sup>

محمد هادی زاهدی<sup>۲</sup>

### چکیده

امروزه شبکه‌های حسگر بی سیم کاربرد گسترده‌ای برای کنترل برنامه‌های نظامی و غیرنظامی، اتوماسیون صنعتی و خانگی، پزشکی و ردیابی پیدا کرده‌اند. اطلاعات حس شده می‌تواند از قبیل رطوبت، دما، فشار، تصاویر مادون قرمز و نوین باشند که برای ارسال در شبکه بسته‌بندی می‌شوند. اما بروز خطا در زمان انتقال ممکن است صحت اطلاعات را به خطر بیندازد. مصرف انرژی کارآمد و انتقال قابل اطمینان در شبکه‌های حسگر از چالش‌های اصلی هستند. برای رسیدن به قابلیت اطمینان، دوروش در شبکه‌های حسگر وجود دارد: افزونگی داده و ارسال مجدد. در این مقاله یک روش ارسال قابل اطمینان نسبی برای ارسال مجدد بسته‌ها، بر اساس ارتباط بین داده‌ها پیشنهاد می‌شود. در این روش در مسیر ارسال داده‌ها مناطقی بعنوان منطقه خطا در نظر گرفته می‌شود. برای ارزیابی روش پیشنهادی از شبیه‌ساز OPNET استفاده می‌شود. نتایج شبیه‌سازی نشان می‌دهد روش پیشنهادی می‌تواند در مصرف انرژی صرفه‌جویی کند و طول عمر شبکه حسگر را افزایش دهد.

**واژگان کلیدی:** ارتباط داده‌ها، ارسال مجدد، اطمینان نسبی، شبکه‌های حسگر بی سیم، قابلیت مناطق خطا.

A\_rezaee@pnu.ac.ir

۱. استادیار دانشکده مهندسی، دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی، تهران، ایران.

Zahedi@kntu.ac.ir

۲. استادیار، گروه مهندسی کامپیوتر و فناوری اطلاعات، دانشگاه پیام نور، تهران، ایران.

تاریخ دریافت مقاله: ۹۵/۷/۲۷؛ تاریخ پذیرش مقاله: ۹۵/۱۱/۲۸

## مقدمه

امروزه شبکه‌های حسگر بی‌سیم (WSNs) با سرعت در حال گسترش هستند و انتظار می‌رود تا ۱۰، ۱۵ سال آینده جهان با شبکه‌های حسگر بی‌سیم پوشانده شود که دسترسی به آن‌ها از طریق اینترنت ممکن خواهد بود. شبکه‌های حسگر بی‌سیم کاربردهای گسترده‌ای در زمینه پزشکی، صنعتی، نظامی، حمل و نقل، مدیریت بحران، سرگرمی و فضاهای هوشمند دارند. این شبکه‌ها شامل هزاران گره حسگر بوده که اطلاعات را از محیط جمع‌آوری کرده و به سمت چاهک (SINK) می‌فرستند. شبکه‌های حسگر بی‌سیم، منابع محدود (بعنوان مثال باتری و ظرفیت پردازش) دارند و باید برای زمانی طولانی بتوانند اطلاعات را منتقل کنند (داماسو و رسا و ماچیل، ۲۰۱۴؛ ونکاتسان و شانموگاول و سابرامانیا، ۲۰۱۳). گره‌های حسگر بطور مدام داده‌ها را از محیط حس کرده و آن‌ها را به چاهک ارسال می‌کنند. این شبکه‌ها از طریق ارتباطات بی‌سیم کار می‌کنند و در آن تمام گره‌ها داده‌های خود را به سمت جلو هدایت می‌کنند. ارتباطات بی‌سیم در شبکه‌های حسگر مستعد خطا هستند که در آن تداخلات، میرایی و محو شدن سیگنال ممکن است باعث بروز خطا در انتقال بسته‌ها شود. به همین علت قابلیت اطمینان به یک موضوع مهم و اصلی تبدیل شده است (محمود، ۲۰۱۵).

در میان استراتژی‌ها برای بازیابی خطا در شبکه‌های حسگر بی‌سیم، ارسال مجدد گره به گره<sup>۱</sup> یک راه مؤثر برای بازیابی بسته‌های از دست رفته است که یک انتقال قابل اطمینان را به صورت کامل به وجود می‌آورد. ارسال مجدد گره به گره، به ما اطمینان می‌دهد که یک نسخه جدید از هر بسته خراب، توسط گره قبلی انتقال داده خواهد شد که به طور قابل توجهی در مصرف انرژی صرفه‌جویی می‌شود. روش‌های دیگر مانند روش افزونگی<sup>۲</sup> در مقایسه با انتقال غیرقابل اطمینان، متوسط درصد پذیرش بسته‌ها را در مقصد افزایش می‌دهد و تأخیر قابل توجهی ندارد (شی و همکاران، ۲۰۰۹؛ نادری و همکاران، ۲۰۱۲). روش افزونگی با اضافه کردن اطلاعاتی یا به بسته داده (در هدر بسته) یا با ایجاد بسته‌های تکراری، یک سری اطلاعات اضافی تولید می‌کند. زمانی که افزونگی اجرا

دوره ۷/ شماره ۲/ پاییز و زمستان ۱۴۰۰، شماره پیاپی ۱۴  
دوفصلنامه مدیریت مهندسی و رایانش نرم

1 Hop by Hop  
2 Redundancy

می‌شود با اضافه کردن این اطلاعات کدهای تصحیح کننده در سطوح مختلف پیچیدگی به کار می‌آیند تا بسته‌های از دست رفته را بازیابی کنند (گستا و همکاران، ۲۰۱۳).

یک گره ممکن است به بیش از یک واحد سنجش مجهز شده باشد. به طور معمول واحد سنجش، داده‌های اسکالر یا چندرسانه‌ای را حس می‌کند. اطلاعات اسکالر نشان دهنده تمام داده‌هایی است که در مقیاس ارائه شده مانند دما و رطوبت بازیابی شده، در حالی که داده‌های چندرسانه‌ای به طور کلی در قالب جریان‌های ویدئویی بازیابی می‌شوند. اگر چه افزودنی داده‌ها ممکن است باعث به وجود آمدن برخی از تنظیمات در سنسورهای اسکالر شود که می‌تواند از یک انتقال قابل اطمینان پر هزینه جلوگیری کند، اما برخی از گره‌ها ممکن است دیدگاه‌های منحصر به فرد یا روش‌های انحصاری برای بازیابی داده‌های خاص از میدان نظارت داشته باشند (آلمالکاو و همکاران، ۲۰۱۰). بنابراین برنامه‌های حیاتی و برنامه‌هایی مانند پزشکی یا کنترل‌های صنعتی که نیاز به کنترل دقیق‌تر دارند، مستلزم فراهم آوردن سطوح مختلفی از قابلیت اطمینان هستند. برای مثال در یک سیستم هشدار آتش، بسته‌هایی که دما را انتقال می‌دهند حیاتی هستند و در صورت از دست رفتن باید بازیابی شوند. عکس‌های مادون قرمز ممکن است بعنوان اطلاعات تکمیلی به حساب آیند که برای نظارت حیاتی نیستند و از دست رفتن آن‌ها قابل تحمل است. برخی از اطلاعات مانند درخشندگی ممکن است بعنوان کمکی فرض شوند به این معنا که برنامه‌های کاربردی می‌توانند ضرر و زیان بسته را تحمل کنند. برخی از اطلاعات مانند سر و صدا و فشار بعنوان غیرضروری برای برنامه در نظر گرفته می‌شوند و به منظور صرفه‌جویی در مصرف انرژی منتقل نمی‌شوند. باید توجه داشت که انواع مختلف اطلاعات ممکن است از یک سنسور یا از بیش از یک گره منبع انتقال داده شوند و برای برنامه‌های متفاوت ممکن است سطوح مختلف ارتباط بین داده‌ها را تعریف کنیم (گوستا و همکاران، ۲۰۱۴).

در این مقاله یک روش انتقال قابل اطمینان نسبی ارائه شده است که در آن تضمین قابلیت اطمینان با توجه به ارتباط داده‌های حس شده برای انتقال اطلاعات در شبکه‌های حسگر بی‌سیم است. در این روش، بسته‌های حمل اطلاعات حیاتی اگر خراب شوند همیشه به روش گره به گره ارسال مجدد می‌شوند. از سوی دیگر بسته‌های حاوی اطلاعات کمکی

به روش غیر قابل اطمینان انتقال داده می‌شوند و در صورت خرابی هرگز بازیابی نمی‌شوند. برای بسته مکمل، سه مکانیزم مختلف قابل اطمینان نسبی برای بازیابی خطا پیشنهاد شده است. دو مکانیزم به روش ارسال مجدد گره به گره است و مکانیزم دیگر افزودن گره در سطح بسته برای بازیابی خطاست. با توجه به پیکربندی شبکه و وقوع خطای احتمالی انتظار می‌رود این روش از نظر مصرف انرژی بهینه باشد در حالی که درصد قابل قبولی از پذیرش بسته را هم داراست.

ادامه مقاله به صورت زیر است. در بخش پیشینه پژوهش کارهای مرتبط در رابطه با مقاله توضیح داده می‌شود. در بخش روش تحقیق مفهوم ارتباط داده‌ها و مناطق خطا مورد بررسی قرار می‌گیرد و روش پیشنهادی برای محاسبه انرژی ارائه می‌شود. در بخش یافته‌های تحقیق با شبیه‌سازی کامپیوتری، کارایی مدل پیشنهادی ارزیابی شده و در آخر، نتیجه‌گیری از مقاله ارائه می‌شود.

### پیشینه پژوهش

بعضی مواقع، سطح مورد نظر از قابلیت اطمینان ممکن است با توجه به ویژگی‌های منطقه مورد نظارت و شبکه مستقر تغییر کند. برای مثال، پروتکل انتقال قابل اطمینان که توسط سانکاراسویرامانیام و همکارانش (۲۰۰۵) ارائه شده است، بر تشخیص رویداد متمرکز شده است. در پروتکل انتقال رویداد به چاهک (ESRT)، حتی اگر بعضی از بسته‌های داده در طول انتقال از دست بروند، بسته به شرایط شبکه، تایید در سمت چاهک انجام می‌شود و می‌توان نرخ انتقال گره منبع را برای فراهم آوردن حداقل اطلاعات ممکن تنظیم کرد. گوستا و همکارانش (۲۰۱۳) یک مکانیزم ارسال مجدد با قابلیت اطمینان نسبی ارائه کرده‌اند که از ارتباط بین بسته‌های اطلاعاتی با توجه به کدگذاری امواج تجزیه شده در طول تصاویر استفاده می‌شود. در این روش سطح قابلیت اطمینان هر بسته تابعی از ارتباط محموله داده است. با این کار برخی از بسته‌های از دست رفته مجدداً ارسال نمی‌شوند که باعث صرفه‌جویی در مصرف انرژی در گره‌های میانی می‌شود و افت کمی در کیفیت تصاویر بازیابی شده در مقصد دارد. در مقاله ژاو و همکاران (۲۰۱۲)، قابلیت اطمینان به وسیله افزودن گره با کدهای تصحیح، انتقال بسته‌ها را زمانی که ارتباط فریم‌های ویدئویی

برای بازسازی داده‌های اصلی در نظر گرفته می‌شود بهینه‌سازی می‌کند در حالی که آن‌ها در سطح مورد نظر از قابلیت اطمینان تعریف شده‌اند.

در مقاله کوستا و گیودس (۲۰۱۳)، با توجه به اطلاعات بصری دریافت شده توسط سنسورها و ارتباط اطلاعات با یکدیگر، یک روش اولویت‌بندی برای گره‌های منبع به ۵ گروه متمایز ارائه شده است. کیفیت بالا در تصاویر دریافتی فقط برای برخی از کاربردها مورد نیاز است. فقط بسته‌هایی که ارتباط بیشتری دارند تحت یک سرویس با قابلیت اطمینان کامل فرستاده می‌شوند و باعث صرفه‌جویی در مصرف انرژی می‌شود. در مقاله کوستا و همکارانش (۲۰۱۳)، اطلاعات حس شده به دو سطح مختلف از ارتباط طبقه‌بندی می‌شوند و یک مکانیزم ارسال مجدد نسبی را پیشنهاد می‌دهد که در آن فقط بسته‌های شامل اطلاعات حیاتی اگر از بین بروند ارسال مجدد می‌شوند و سایر بسته‌ها در صورتی که خراب شوند ارسال مجدد نمی‌شوند تا در مصرف انرژی صرفه‌جویی شود. در مقاله کوستا و همکارانش (۲۰۱۴)، اطلاعات حس شده به سه سطح مختلف از ارتباط طبقه‌بندی می‌شوند. در این روش بسته‌های حاوی اطلاعات حیاتی در صورت از دست رفتن با استفاده از یک روش ارسال مجدد گره به گره ارسال می‌شوند. بسته‌های حاوی اطلاعات مکمل با توجه به تنظیمات در نظر گرفته شده بازیابی می‌شوند و بسته‌های حاوی اطلاعات کمکی هرگز بازیابی نخواهند شد.

اکثر روش‌های ارائه شده برای ایجاد قابلیت اطمینان به طور معمول سطحی از قابلیت اطمینان را در انتقال همه بسته‌ها در نظر می‌گیرند و تضمین قابلیت اطمینان برای برنامه‌های حیاتی به طور سخت و جدی در نظر گرفته نمی‌شود. بنابراین، در این مقاله یک روش ارسال قابل اطمینان نسبی پیشنهاد شده است که تفاوت بسته‌های داده، با توجه به ارتباط بین آن‌ها در مانیتورینگ برنامه است. همچنین مفهوم "مناطق خطا" بعنوان مجموعه‌ای از مناطقی که در آن بسته‌ها با احتمال خطای بالاتری دریافت می‌شوند تعریف می‌شود. این مناطق خطا در هر نقطه ممکن است اتفاق بیفتند و معمولاً بستگی به خصوصیات منطقه مورد نظارت دارند.

## روش شناسی پژوهش

در این مقاله یک روش ارسال قابل اطمینان نسبی بر اساس ارتباط داده‌ها برای شبکه‌های حسگر بی‌سیم پیشنهاد شده است که در آن بسته‌های داده بر اساس ارتباط‌های مختلف با قابلیت‌های اطمینان متفاوت گارانتی می‌شوند. بسته‌های داده به سه گروه مختلف تقسیم می‌شوند که به هر یک سرویس انتقال خاص تخصیص داده می‌شود. در این روش با توجه به این که احتمال رخ دادن خطا به صورت پویا ممکن است در هر نقطه از مسیر رخ دهد، مجموعه‌ای از گره‌ها بعنوان مناطق خطا در نظر گرفته می‌شوند.

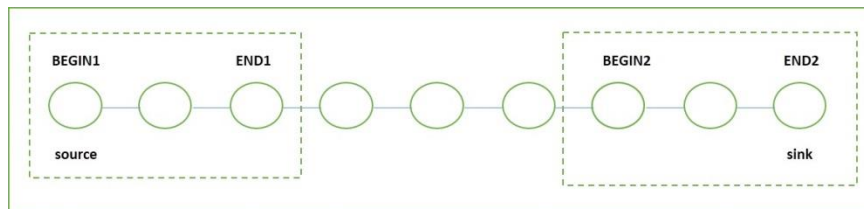
در روش پیشنهادی، داده‌ها به سه گروه مختلف تقسیم‌بندی می‌شوند: داده‌های حیاتی، مکمل و کمکی. داده‌های حیاتی دارای بالاترین درجه ارتباط با یکدیگر هستند و در صورت از دست رفتن باید ارسال مجدد شوند. داده‌های مکمل دارای درجه ارتباط پایین‌تری نسبت به داده‌های حیاتی هستند و برنامه می‌تواند تا حدی از دست رفتن آن‌ها را تحمل کند. داده‌های کمکی دارای پایین‌ترین سطح از ارتباط هستند و در صورت از دست رفتن هرگز ارسال مجدد نمی‌شوند. در جدول شماره ۱ انواع ارتباط داده‌ها مشخص شده است.

جدول ۱- ارتباط داده‌ها

نوع ارتباط	درجه ارتباط	سرویس انتقال
داده‌های حیاتی	۲	قابلیت اطمینان کامل
داده‌های مکمل	۱	قابلیت اطمینان نسبی
داده‌های کمکی	۰	بدون قابلیت اطمینان

## مناطق خطا

مناطق خطا به مجموعه‌ای از گره‌ها گفته می‌شود که در آن‌ها بسته‌ها با احتمال خطای بالاتری دریافت می‌شوند. این خطاها مثلاً ممکن است ناشی از نویز در محیط‌های صنعتی باشند یا بر اثر بروز ازدحام در مسیر به جود آیند. در این مقاله ابتدا و انتهای مسیر بعنوان مناطقی که نزدیک منبع و چاهک هستند با توجه به احتمال بروز ازدحام بالاتر بعنوان مناطق خطا در نظر گرفته شده است. در شکل شماره ۱ مفهوم مناطق خطا نشان داده شده است.



شکل ۱ - پیکر بندی مناطق خطا

### ارسال بسته‌ها

بسته‌های حیاتی در هر کجای مسیر چنانچه از دست بروند ارسال مجدد می‌شوند. برای تصدیق ارسال این بسته‌ها از پیام ACK استفاده می‌شود. گره‌های میانی هم بسته‌ها را به سمت چاهک با روش (FIFO) هدایت می‌کنند و بسته‌های حیاتی در صورتی از سر صف حذف می‌شوند که پیام تصدیق آن‌ها دریافت شده باشد. بسته‌های کمکی هم در هر کجای مسیر از دست روند هرگز بازبازی نخواهند شد زیرا از ارتباط داده پایینی برخوردار هستند و از دست رفتن آن‌ها قابل تحمل است. این بسته‌ها تحت یک سرویس غیرقابل اطمینان انتقال داده می‌شوند. اما بسته‌های مکمل با توجه به این که در کجای مسیر از دست رفته باشند، بازبازی خواهند شد. بسته‌های مکمل ممکن است یا داخل منطقه خطا از دست بروند یا خارج از منطقه خطا. بسته‌های مکمل تحت سه روش O\_Z, I\_Z و افزونگی بازبازی خواهند شد.

### محاسبه انرژی مصرفی

در این مقاله، شبکه حسگر بی‌سیم از P مسیر گره به گره و یگ گره منبع S تشکیل شده است. هر مسیر  $p=1, \dots, P$  شامل  $H(p)$  گره میانی است. که در آن بسته‌ها از سمت گره منبع ( $h=0$ ) به سمت گره چاهک ( $h=H(p)+1$ ) فرستاده می‌شوند. اگر تعداد بسته‌های ارسال شده با  $W(p)$  نشان داده شود و اندازه هر بسته برابر با  $k$  بیت باشد بنابراین تعداد بیت‌های فرستاده شده از گره  $h$  به گره  $h+1$  برابر خواهد بود با  $D(p,h) = W(p) \cdot k$  و اگر اندازه هر بسته پیام تصدیق را با  $a$  نشان دهیم تعداد بیت‌های ارسالی پیام تصدیق از گره  $h$  به گره  $h+1$  برابر  $A(p,h) = W(p) \cdot k$  خواهد بود.

انرژی مصرفی در شبکه‌های حسگر به فاکتورهای گوناگونی مانند قدرت رادیویی گره، قدرت ارسال و دریافت و قدرت فیزیکی پروتکل لایه MAC بستگی دارد. کل انرژی مصرفی از فرمول زیر محاسبه می‌شود (گوستا و همکاران، ۲۰۱۳).

$$= \sum_{h=0}^{H(p)+1} (Et_{(p,h)} + E_{(p)}) \quad \text{رابطه (۱)} \\ Er_{(p,h)}$$

انرژی مصرفی در گره  $p$  برابر است با مجموع انرژی ارسال  $Et_{(p,h)}$  و انرژی دریافت  $Er_{(p,h)}$  تمام گره‌ها از چاهک تا گره مربوطه. انرژی ارسال و دریافت گره، به مقدار کل بیت‌های فرستاده یا دریافت شده  $D_{(p,h)}$ ، مقدار پیام‌های تصدیق  $A_{(p,h)}$ ، انرژی مصرفی برای ارسال  $Pwt_{(p,h)}$  یا دریافت  $Pwr_{(p,h)}$ ، زمان انتقال برای ۱ بیت  $tx_{(p,h)}$ ، قدرت سوئیچینگ  $Pws_{(p,h)}$  و زمان سوئیچینگ  $ts_{(p,h)}$  بستگی دارد. انرژی مصرفی برای ارسال و دریافت از فرمول‌های زیر محاسبه می‌شود (گوستا و همکاران، ۲۰۱۳؛ گوستا و همکاران، ۲۰۱۴):

$$Et_{(p,h)} \quad \text{رابطه (۲)}$$

$$= \begin{cases} (D_{(p,h)} + A_{(p,h)}) \cdot Pwt_{(p,h)} \cdot tx_{(p,h)} + 2 \cdot W_p \cdot Pws_{(p,h)} \cdot ts_{(p,h)} \\ D_{(p,h)} + Pwt_{(p,h)} \cdot tx_{(p,h)} + W_p \cdot Pws_{(p,h)} \cdot ts_{(p,h)} , h = 0 \\ A_{(p,h)} \cdot Pwt_{(p,h)} \cdot tx_{(p,h)} + W_p \cdot Pws_{(p,h)} \cdot ts_{(p,h)} , h = H(p) + \end{cases}$$

$$Er_{(p,h)} \quad \text{رابطه (۳)}$$

$$= \begin{cases} (D_{(p,h)} + A_{(p,h)}) \cdot Pwr_{(p,h)} \cdot tx_{(p,h)} + 2 \cdot W_p \cdot Pws_{(p,h)} \cdot ts_{(p,h)} \\ A_{(p,h)} \cdot Pwr_{(p,h)} \cdot tx_{(p,h)} + W_p \cdot Pws_{(p,h)} \cdot ts_{(p,h)} , h = 0 \\ D_{(p,h)} + Pwr_{(p,h)} \cdot tx_{(p,h)} + W_p \cdot Pws_{(p,h)} \cdot ts_{(p,h)} , h = H(p) \end{cases}$$

اگر احتمال از دست دادن بسته را  $Pd_{(p,h)}$  و احتمال از دست رفتن بسته‌های تصدیق را  $Pa$  در نظر بگیریم، درصد احتمال دریافت موفقیت آمیز بسته برابر خواهد بود با: 1- $Pd_{(p,h)}$  و احتمال ارسال مجدد پیام‌های تصدیق برابر خواهد بود با: (گوستا و همکاران، ۲۰۱۳؛ گوستا و همکاران، ۲۰۱۴).

$$((1 - Pd_{(p,h)}) \cdot Pa_{(p,h)}) \quad \text{رابطه (۴)}$$

برای محاسبه  $Pd$  از مدل خطای Gilbert/Elliott در [۱۰] استفاده شده است که برابر است با:

$$= 1 - (G_{(p,h)} \cdot g_{(p,h)}^n + B_{(p,h)} \cdot (1 - b_{(p,h)}) \cdot g_{(p,h)}^{(n-1)}) Pd_{(p,h)} \quad \text{رابطه (۵)}$$



میانگین بسته‌های ارسال شده (در حالت اولیه و ارسال مجدد) برای داده‌ها و پیام‌های تصدیق از فرمول‌های زیر بدست می‌آید:

$$Rd_{(p,h)} = \frac{1}{1 - (Pd_{(p,h)} + (1 - Pd_{(p,h)}) \cdot Pa_{(p,h)})} \quad \text{رابطه ۶}$$

$$Ra_{(p,h)} = \frac{(1 - Pd_{(p,h)})}{1 - (Pd_{(p,h)} + (1 - Pd_{(p,h)}) \cdot Pa_{(p,h)})} \quad \text{رابطه ۷}$$

بنابراین مقدار نهایی بیت‌های ارسال شده و پیام‌های تصدیق به صورت زیر محاسبه خواهد شد (کوستا و همکاران، ۲۰۱۳):

$$Rd_{(p,h)} \cdot D_{(p,h)} = W_{(p)} \cdot k \quad \text{رابطه ۸}$$

$$Ra_{(p,h)} \cdot A_{(p,h)} = W_{(p)} \cdot k \quad \text{رابطه ۹}$$

### محاسبه انرژی مصرفی در روش I\_Z و O\_Z

انرژی مصرفی زمانی که ارسال مجدد در داخل منطقه خطا صورت گیرد (I\_Z) و زمانی که در خارج (O\_Z) از منطقه خطا صورت گیرد نتایج متفاوتی به ما خواهد داد. انرژی مصرفی به تعداد بسته‌های داده  $D_{(p,h)}$  و تعداد پیام‌های تصدیق  $A_{(p,h)}$  بستگی دارد که در داخل یا خارج از منطقه خطا ارسال مجدد می‌شوند. بنابراین همانطور که در جدول شماره ۲ نشان داده شده است، در روش پیشنهادی تعداد بسته‌های داده و پیام‌های تصدیق با توجه به بروز مناطق مختلف خطا محاسبه می‌شوند.

جدول ۲- محاسبه مقدار پارامتر  $A_{(p,h)}$  و  $D_{(p,h)}$

روش ارسال مجدد	مقدار پارامتر $A_{(p,h)}$ و $D_{(p,h)}$	
ارسال مجدد به روش I_Z	$D_{(p,h)} = \begin{cases} W_{(p)} \cdot k \cdot Rd_{(p,h)}, & h \leq E1 \\ W_{(p)} \cdot k \cdot \prod_{j=E1}^{h-1} (1 - Pd_{(p,h)}), & E1 < h < B2 \\ W_{(p)} \cdot k \cdot \prod_{j=E1}^{h-1} (1 - Pd_{(p,h)}) \cdot Rd_{(p,h)}, & h \geq B2 \end{cases}$ $A_{(p,h)} = \begin{cases} W_{(p)} \cdot a \cdot Ra_{(p,h)}, & h \leq E1 \\ 0, & E1 < h < B2 \\ W_{(p)} \cdot a \cdot \prod_{j=E1}^{B2} (1 - Pd_{(p,h)}) \cdot Ra_{(p,h)}, & h \geq B2 \end{cases}$	رابطه ۱۰

ارسال مجدد به روش O_Z	$D_{(p,h)} = \begin{cases} W_{(p)} \cdot k \cdot \prod_{j=0}^h (1 - Pd_{(p,h)}) & , h \leq E1 \\ W_{(p)} \cdot k \cdot \prod_{j=0}^{E1} (1 - Pd_{(p,h)}) \cdot Rd_{(p,h)} & , E1 < h < B2 \\ W_{(p)} \cdot k \cdot \prod_{j=0}^{E1} (1 - Pd_{(p,h)}) \cdot \prod_{j=B2}^h (1 - Pd_{(p,h)}) & , h \geq B2 \end{cases}$	رابطه (۱)
	$A_{(p,h)} = \begin{cases} 0 & , h \leq E1 \\ W_{(p)} \cdot a \cdot \prod_{j=0}^{E1} (1 - Pd_{(p,h)}) \cdot Ra_{(p,h)} & , E1 < h < B2 \\ W_{(p)} \cdot a \cdot \prod_{j=E1}^{B2} (1 - Pd_{(p,h)}) \cdot Ra_{(p,h)} & , h \geq B2 \end{cases}$	

زمانی که بسته‌ها از داخل منطقه خطا عبور می‌کنند به صورت بالقوه خطاهای انتقال افزایش پیدا می‌کند. علاوه بر این، بسته‌ها نیز می‌توانند در ادامه مسیر (خارج از منطقه خطا)، با احتمال خطای پایین‌تر خراب شوند. در این مقاله همانطور که در شکل شماره ۲ نشان داده شده است، با توجه به این که در نزدیکی گره منبع و گره چاهک معمولاً ازدحام بیشتری وجود دارد، پیکربندی منطقه خطا در ابتدا و انتهای مسیر در نظر گرفته شده است. زمانی که نرخ از دست رفتن بسته‌ها بزرگتر از صفر باشد، اگر بسته‌های از دست رفته ارسال مجدد نشوند، متوسط داده‌هایی که به سمت چاهک می‌روند کاهش پیدا می‌کند و اگر ارسال مجدد انجام شود دقیقاً همان تعداد اطلاعاتی که از گره قبلی توسط یک گره میانی دریافت می‌شود به گره بعدی انتقال داده می‌شود.

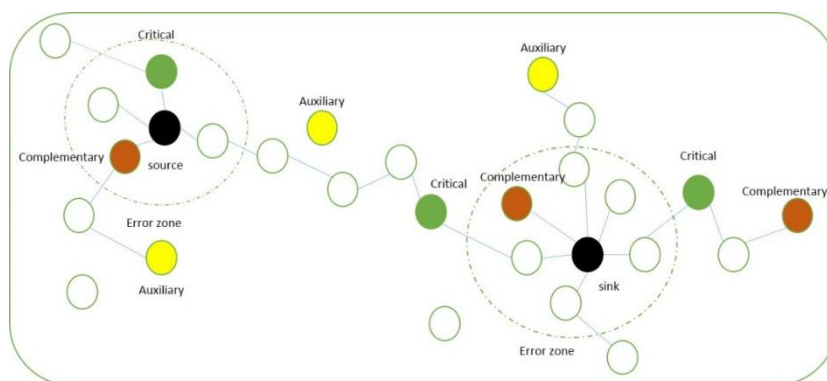
بعنوان مثال در فرمول ۱۰، مقدار  $D_{(p,h)}$  زمانی که بسته‌ها از داخل منطقه خطا عبور می‌کنند و چنانچه ارسال مجدد در خارج از منطقه خطا انجام شود، کاهش پیدا می‌کند که در فرمول ۱۱ نشان داده شده است. در فرمول ۱۱، زمانی که بسته‌ها از داخل منطقه خطا بیرون آمدند و چنانچه از دست روند، ارسال مجدد می‌شوند پس مقدار تمام بسته‌ها به طور کامل دریافت شود. بنابراین احتمال خطای انتقال در داخل منطقه خطا برای  $h \leq E1$  برابر است با  $\prod_{j=0}^h (1 - Pd_{(p,h)})$ .

### محاسبه انرژی مصرفی در روش افزونگی

در روش افزونگی یک کپی از بسته اصلی همراه با بسته برای انعطاف‌پذیری در مقابل خطا ارسال می‌شود. در این روش بسته‌های خراب شده هرگز ارسال مجدد نمی‌شوند و وظیفه چاهک تشخیص بسته‌های اضافی و کپی است. بنابراین در این روش از پیام تصدیق استفاده نمی‌کنیم یعنی مقدار  $A(p,h)$  برابر صفر خواهد بود و مقدار  $D(p,h)$  از فرمول زیر بدست می‌آید (گوستا و همکاران، ۲۰۱۴):

$$= 2 \cdot W(p) \cdot k \cdot \prod_{j=0}^h (1 - Pd_{(p,h)}) D_{(p,h)} \quad \text{رابطه ۱۲}$$

این روش ساده، با این که پیچیدگی ارسال مجدد را ندارد اما درصد پذیرش بسته‌ها را افزایش می‌دهد. بسته‌های تکراری نیز در چاهک شناسایی و حذف می‌شوند.



شکل ۲- سناریوی بکار رفته در شبیه‌سازی

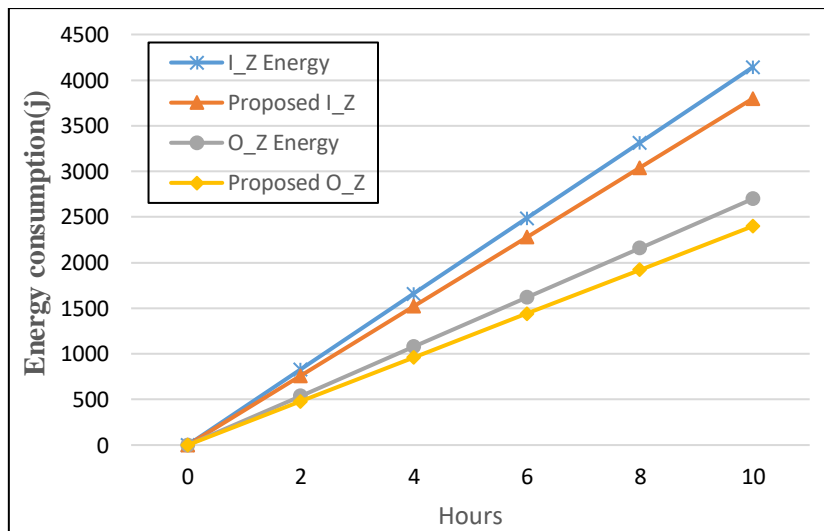
### یافته‌های پژوهش

انرژی مصرفی در روش پیشنهادی برای سه نوع داده و یک مدل منطقه‌ای از خطا مورد بررسی قرار گرفته است. برای شبیه‌سازی از نرم‌افزار OPNET استفاده شده، با فرض این که یک گره منبع داریم که در هر ثانیه ۵ بسته تولید می‌کند و مسیر متشکل از ده گره میانی است که احتمال از دست رفتن بسته‌ها در داخل منطقه خطا ۱۵٪ و خارج از منطقه خطا ۵٪ است. برای تمام شبیه‌سازی، مقدار  $a=40$  byte،  $Pwt_{(p,h)} = 57.42mW$ ،  $ts_{(p,h)} = 10\mu$ ،  $tx_{(p,h)} = 4\mu s$ ،  $Pws_{(p,h)} = 62mW$ ،  $Pwr_{(p,h)} = 62mW$  گرفته شده است. انرژی مصرفی روش پیشنهادی با روش قبلی در شرایط پیاده‌سازی یکسان

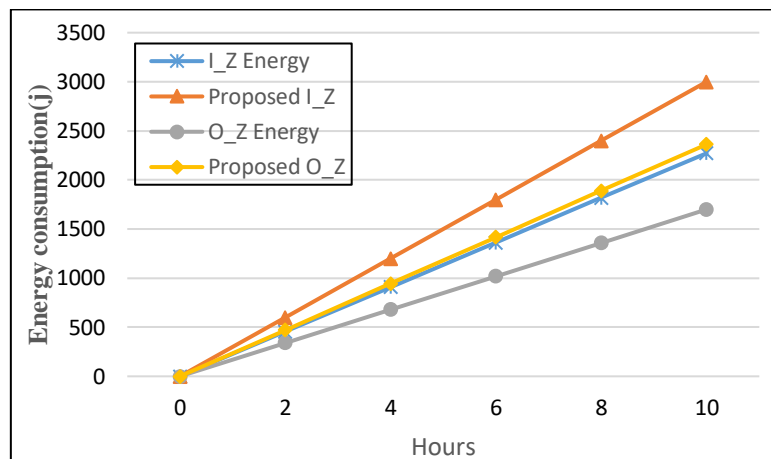
مورد مقایسه قرار گرفته و نتایج نشان می‌دهد تاحدی روش پیشنهادی در مصرف انرژی صرفه‌جویی می‌کند.

در شکل شماره ۳ انرژی مصرفی روش پیشنهادی با روش قبلی مورد مقایسه قرار گرفته است. در روش پیشنهادی ابتدا و انتهای مسیر بعنوان مناطق خطا در نظر گرفته شده است در حالی که در روش قبلی فقط ابتدا یا انتهای مسیر به طور جداگانه بعنوان منطقه خطا در نظر گرفته شده است. شکل شماره ۳ مقایسه روش پیشنهادی با منطقه خطا در ابتدای مسیر در روش قبلی است. در روش I\_Z ارسال مجدد برای بسته‌های مکمل از دست رفته فقط داخل منطقه خطا صورت می‌گیرد یعنی در ابتدا و انتهای مسیر. در روش O\_Z ارسال مجدد بسته‌های مکمل از دست رفته خارج از منطقه خطا یعنی در وسط مسیر صورت می‌گیرد.

در شکل شماره ۴ مقایسه روش پیشنهادی با روش قبلی صورت گرفته در صورتی که منطقه خطا در انتهای مسیر است. در روش قبلی منطق خطا در انتهای مسیر و نزدیک چاهک در نظر گرفته شده است و در روش پیشنهادی مناطق خطا در ابتدا و انتهای مسیر در نظر گرفته شده است.



شکل ۳- مصرف انرژی نسبت به زمان (مقایسه با منطقه خطا ابتدای مسیر)

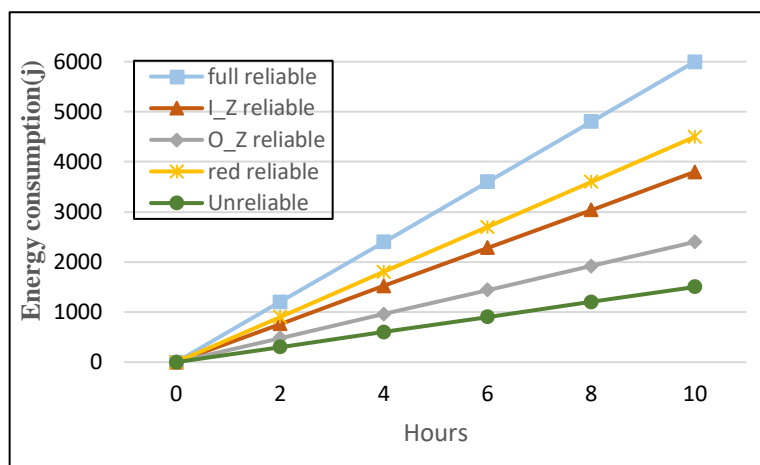


شکل ۴- مصرف انرژی نسبت به زمان (مقایسه با منطقه خط انتهای مسیر)

روش پیشنهادی همان طور که در جداول مربوط به شکل ۳ و ۴ مشاهده می‌شود فقط در مقایسه با روش اول انرژی بیشتری ذخیره می‌کند. زیرا در مقایسه با روش دوم که منطقه خطا در انتهای مسیر در نظر گرفته شده است، با توجه به وجود گره منبع در ابتدای مسیر و احتمال بروز خطا، بیشترین اتلاف بسته و ازدحام در ابتدای مسیر وجود دارد. بنابراین زمانی که منطقه خطا در انتهای مسیر در نظر گرفته می‌شود بسیاری از بسته‌ها را از ابتدای مسیر از دست داده‌ایم و با توجه به این که محاسبه انرژی در روش پیشنهادی ارتباط مستقیم با تعداد بسته‌های رسیده دارد بنابراین با از دست رفتن بسته‌ها مقدار انرژی مصرفی در شبکه کاهش می‌یابد. اما در روش اول که منطقه خطا در ابتدای مسیر در نظر گرفته شده، روش پیشنهادی با به وجود آوردن موازنه‌ای بین مناطق خطا در ابتدا و انتهای مسیر تا حدی توانسته است در مصرف انرژی صرفه‌جویی کند.

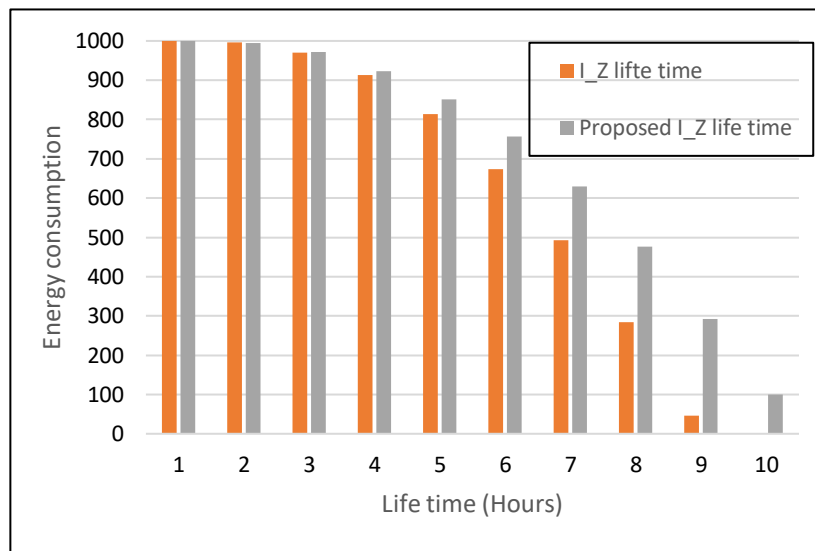
در شکل شماره ۵، ارسال بسته‌ها تحت سرویس‌های مختلف قابلیت اطمینان در داخل منطقه خطا نشان داده شده است. همانطور که مشاهده می‌شود چنانچه تمام بسته‌ها را با قابلیت اطمینان کامل ارسال کنیم، انرژی زیادی در شبکه مصرف می‌شود و چنانچه بسته‌ها را تحت یک سرویس غیر قابل اطمینان منتقل کنیم انرژی خیلی کمی در شبکه مصرف می‌شود. اما با روش پیشنهادی می‌توان بسته‌های داده را تحت یک سرویس دیگر که قابلیت اطمینان را به صورت نسبی فراهم می‌کند منتقل کرد. برای بسته‌های مکمل ما قابلیت اطمینان نسبی را فراهم آوردیم که تحت سه روش انجام می‌پذیرد. روش ارسال مجدد در

داخل منطقه خطا I\_Z، ارسال مجدد خارج از منطقه خطا O\_Z و روش افزودگی که در صورت از دست رفتن بسته‌ها یک کپی از آن‌ها را مجدد ارسال می‌کند. می‌توان نتایج بدست آمده از انتقال بسته‌ها را تحت این سرویس‌ها در شکل شماره ۵ مشاهده کرد.

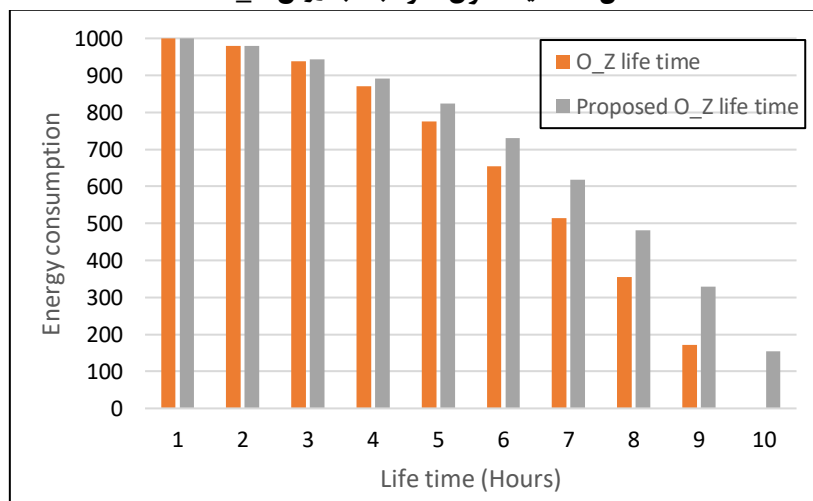


شکل ۵- مقایسه انرژی مصرفی در منطقه خطا

با کاهش انرژی مصرفی در شبکه‌های حسگر، طول عمر این شبکه‌ها افزایش پیدا می‌کند. با توجه به نتایج شبیه‌سازی در روش اول انرژی مصرفی در شبکه حسگر کاهش یافته است. بنابراین طول عمر این شبکه‌ها در دو حالت I\_Z و O\_Z مورد بررسی قرار گرفت و همان‌طور که در شکل‌های شماره ۶ و ۷ نشان داده شده است، طول عمر شبکه در روش پیشنهادی افزایش پیدا می‌کند.



شکل ۶- مقایسه طول عمر شبکه به روش I\_Z



شکل ۷- مقایسه طول عمر شبکه به روش O\_Z

### نتیجه‌گیری و پیشنهادها

در این مقاله، یک روش ارسال قابل اطمینان نسبی پیشنهاد شده است که در آن بسته‌ها با توجه به ارتباط بین آن‌ها به سه دسته تقسیم می‌شوند. بسته‌های حیاتی تحت سرویس قابل اطمینان فرستاده می‌شوند و چنانچه خراب یا گم شوند حتما ارسال مجدد می‌شوند. بسته‌های کمکی نیز تحت یک سرویس غیرقابل اطمینان فرستاده می‌شوند و در

صورت خرابی هرگز ارسال مجدد نخواهند شد. اما بسته‌های مکمل با توجه به این که داخل منطقه خطا یا خارج از منطقه خطا از دست بروند ارسال مجدد خواهند شد. روش دیگری که برای از دست رفتن بسته‌های مکمل استفاده می‌شود، روش افزودگی داده است. در روش افزودگی یک کپی از بسته، همراه آن نیز فرستاده می‌شود و تشخیص بسته‌های تکراری به عهده گره چاهک است.

در شبکه‌های حسگر، پیش بینی مناطق خطا کار دشواری است و ممکن است در هر منطقه اتفاق بیفتد. اما در این مقاله سعی شده است نسبت به روش قبلی منطقه خطا پویاتر شده و موازنه‌ای بین مناطق خطای ابتدا و انتهای مسیر در نظر گرفته شود. با توجه به تغییر تنظیمات شبکه‌ها در طول عمرشان گاهی ممکن است بهترین روش برای ارسال مجدد داخل منطقه خطا و گاهی خارج از منطقه خطا باشد. اما برای مناطق با احتمال خطای بالاتر، این روش نه تنها از افزایش مصرف انرژی جلوگیری می‌کند بلکه انرژی را تا حد زیادی ذخیره خواهد کرد. نتایج شبیه‌سازی نشان می‌دهند که با صرفه‌جویی در انرژی مصرفی، طول عمر شبکه تا حدودی افزایش پیدا کرده است.



## منابع

- Almalkawi, I., Zapata, M., Al-Karaki, J., & Morillo-Pozo, J. (2010). Wireless multimedia sensor networks: current trends and future directions. *Sens.* 10 (pp. 6662–6717). doi:10.3390/s100706662.
- Costa, D., & Guedes, L. (2013). Exploiting the sensing relevancies of source nodes for optimizations in visual sensor networks. *Multimed. Tools Appl.* 64 (pp. 549–579). doi:10.1007/s11042-011-0961-4.
- COSTA, D., A GUEDES, L., VASQUES, F., & Portugal, P. (2013). Redundancy-Based Semi-Reliable Packet Transmission in Wireless Visual Sensor Networks Exploiting the Sensing Relevancies of Source Nodes. *WSEAS TRANSACTIONS on COMMUNICATIONS*.
- Costa, D., A Guedes, L., Vasques, F., & Portugal, P. (2014). Relevance-based partial reliability in wireless sensor networks. *EURASIP Journal on Wireless Communications and Networking*.
- Costa, D., Guedes, A., Vasques, F., & Portugal, P. (2013). Energy-Efficient Packet Relaying in Wireless Image Sensor Networks Exploiting the Sensing Relevancies of Source Nodes and DWT Coding. *Sens.* 2 (pp. 424-448). doi:10.3390/jsan2030424.
- Costa, D., Guedes, L., Vasques, F., & Portugal, P. (2013). Partial energy-efficient hop-by-hop retransmission in wireless sensor networks. in *Proceedings of IEEE INDIN. Bochum*.
- Dâmaso, A., Rosa, N., & Maciel, P. (2014). Reliability of Wireless Sensor Networks, *Sens.* 14. (pp. 15760-15785). doi:10.3390/s140915760.
- Han, B., & Lee, S. (2007). Efficient packet error rate estimation in wireless networks. in *Proceedings of TridentCom. Orlando*.
- Mahmood, A. (2015). Reliability in wireless sensor networks: A survey and challenges ahead. *Comput.Netw.*
- Naderi, M., Rabiee, H., Khansari, M., & Salehi, M. (2012). Error control for multimedia communications in wireless sensor networks: a comparative performance analysis. *Ad Hoc Netw.* 10 (pp. 1028–1042). doi:10.1016/j.adhoc.2012.01.003.
- Sankarasubramaniam, Y., Akan, Ö., Akyildiz, I., & ESRT. (2005). event-to-sink reliable transport in wireless sensor networks. *IEEE/ACM Trans. Netw.* 13 (pp. 1003–1016). doi:10.1109/TNET.2005.857076.
- She, H., Lu, Z., Jantsch, A., Zhou, D., & Zheng, L.-R. (2009). Analytical evaluation of retransmission schemes in wireless sensor networks. in *Proceedings of Vehicular Technology Conference. Barcelona*.
- Venkatesan, L., Shanmugavel, S., & Subramaniam, C. (2013). A Survey on Modeling and Enhancing Reliability of Wireless Sensor Network. *Wireless Sensor Network*, 5, (pp. 41-51).
- Zhao, Z., Rosário, D., Cerqueira, E., Immich, R., & Curado, M. (2012). QoE-aware FEC mechanism for intrusion detection in multi-tier wirelessmultimedia sensor networks. in *Proceedings of IEEE WiMob. Barcelona*.