

Vol. 13/ No. 52/Summer 2024

Research Article

Improving Efficiency and Reliability in The Seismic Monitoring Systems Based on The Internet of Things by Applying Redundancy in Sensors and Controllers

Iman Zangeneh, PhD Student¹  | Amir Massoud Bidgoli, Associate Professor^{2*}  | Ardashir Dolati, Professor³ 

¹Department of Computer Engineering, North Tehran Branch, Islamic Azad University, Tehran, Iran,
i.zangeneh@iau-tnb.ac.ir

²Department of Computer Engineering, North Tehran Branch, Islamic Azad University, Tehran, Iran,
am_bidgoli@iau-tnb.ac.ir

³ Department of computer science, Faculty of science, Shahed University, Tehran, Iran,
dolati@shahed.ac.ir

Correspondence

Amir Massoud Bidgoli, Associate Professor of Computer Engineering, North Tehran Branch, Islamic Azad University, Tehran, Iran,
am_bidgoli@iau-tnb.ac.ir

Received: 3 October 2023

Revised: 6 December 2023

Accepted: 18 December 2023

Abstract

Earthquakes are usually associated with damage. Therefore, any action to predict it is necessary. In data monitoring systems, being real-time and accuracy of data play a key role. In this article, a monitoring system based on Internet of Things was proposed for the messaging of seismic data. In the first solution, the lightweight protocol Message Queuing Telemetry Transfer (MQTT) was chosen for messaging. In the second solution, redundancy was applied in the sensor layer using the gray wolf algorithm, and in the third solution «redundancy was applied in the controller layer. The simulation results showed that the redundancy in the sensor and controller layer saved energy consumption by more than thirty percent. Also, the average end-to-end delay was significantly reduced in the second and third solutions. Finally «in the first solution, the rate of successful package delivery for different number of packages was a constant value of 78.98%. But by applying redundancy in the sensor and controller, the package delivery rate increased to over 92%, which can be the result of increasing the number of sensors and controllers and their proper placement.

Keywords: Seismic, Internet of Things, Energy Consumption, Packet Delivery Rate, Bit Error.

Highlights

- Improving the efficiency of the seismic monitoring system by applying the redundancy of the sensors of the sensors layer based on the Internet of Things.
- Applying redundancy in the controller layer of seismography system based on Internet of Things.
- Improving fault tolerance in the communication layer of the Internet of Things by modifying the information transmission mechanisms from the controller to the infrastructure layer.

Citation: I. Zangeneh, A.M. Bidgoli, and A. Dolati, "Improving Efficiency and Reliability in The Seismic Monitoring Systems Based on The Internet of Things by Applying Redundancy in Sensors and Controllers," *Journal of Southern Communication Engineering*, vol. 13, no. 52, pp. 11–34, 2024, doi: 10.30495/jce.2023.1997717.1228, [in Persian].

مقاله پژوهشی

بهبود کارایی و قابلیت اطمینان در سیستم مانیتورینگ داده‌های لرزه نگاری مبتنی بر اینترنت اشیا با اعمال افزونگی در سنسورها و کنترلرها

ایمان زنگنه^۱ | امیرمسعود بیدگلی^۲ | اردشیر دولتی^۳

چکیده

زلزله معمولا خسارات همراه است. لذا هر اقدامی در جهت پیش‌بینی آن ضروری است. در سیستم‌های مانیتورینگ داده، بلادرنگ بودن و صحت و دقت داده‌ها، نقشی کلیدی دارد. در این مقاله، یک سیستم مانیتورینگ مبتنی بر اینترنت اشیا، برای پیام‌رسانی داده‌های مربوط به لرزه‌نگاری پیشنهاد شد. در راهکار اول، پروتکل سبک وزن انتقال تله‌متری صف پیام (MQTT) برای پیام‌رسانی انتخاب و بررسی شد. در راهکار دوم، با استفاده از الگوریتم گرگ خاکستری، افزونگی در لایه حسگر اعمال شد و در راهکار سوم، افزونگی در لایه کنترلر نیز اعمال شد. نتایج شبیه‌سازی نشان داد که افزونگی در لایه حسگر و کنترلر تا بیش از سی درصد در مصرف انرژی، صرفه جویی ایجاد کرد. همچنین میانگین تاخیر آنها به انتها در راهکار دوم و سوم بصورت معناداری کاهش یافت. نهایتا در راهکار اول، نرخ تحویل موفق بسته‌ها برای تعداد مختلف بسته‌ها، مقدار ثابت ۷۸/۹۸ درصد بود. اما با اعمال افزونگی در حسگر و کنترلر، نرخ تحویل بسته‌ها به بالای ۹۲ درصد افزایش یافت که این میتواند نتیجه افزایش تعداد حسگرها و کنترلرها و جایگذاری مناسب آنها باشد.

کلید واژه‌ها: زلزله، اینترنت اشیا، مصرف انرژی، نرخ تحویل بسته، خطای

بیتی

^۱ گروه مهندسی کامپیوتر، واحد تهران‌شمال، دانشگاه آزاد اسلامی، تهران، ایران، i.zangeneh@iau-tnb.ac.ir

^۲ گروه مهندسی کامپیوتر، واحد تهران‌شمال، دانشگاه آزاد اسلامی، تهران، ایران، am_bidgoli@iau-tnb.ac.ir

^۳ گروه علوم کامپیوتر، دانشکده علوم پایه، دانشگاه شاهد، تهران، ایران، dolati@shahed.ac.ir

نویسنده مسئول

^{*} امیرمسعود بیدگلی، گروه مهندسی کامپیوتر، واحد تهران‌شمال، دانشگاه آزاد اسلامی، تهران، ایران، am_bidgoli@iau-tnb.ac.ir

تاریخ دریافت: ۱۱ مهر ۱۴۰۲

تاریخ بازنگری: ۱۵ آذر ۱۴۰۲

تاریخ پذیرش: ۲۷ آذر ۱۴۰۲

<https://doi.org/10.30495/jce.2023.1997717.1228>

۱- مقدمه

زمین لرزه به مجموعه‌ای از لرزش‌ها و ارتعاشات لرزه‌ای اطلاق می‌شود که در اثر آزاد شدن ناگهانی مقدار زیادی انرژی در لیتوسفر^۱ زمین ایجاد می‌شود. این امواج لرزه‌ای از ضعیف تا متوسط تا بسیار شدید هستند. علت اصلی وقوع زلزله فعالیت صفحات تکتونیکی^۲ است [۱]. در نتیجه، پیش‌بینی زلزله به عنوان یکی از پیچیده‌ترین و گران‌ترین فجایع طبیعی به یک کار چالش برانگیز و حیاتی برای بشریت تبدیل شده است. پیش‌بینی مؤثر زلزله این پتانسیل را دارد که تخریب زلزله را به میزان قابل توجهی به حداقل برساند، که برای جامعه و مردم بسیار مناسب است، و به نظر می‌رسد که افزایش علاقه و تحقیقات علمی در مورد پیش‌بینی رویدادهای لرزه‌ای وجود دارد [۲]. از آن سوی برخلاف پیش‌بینی‌های هواشناسی یا حتی هشدارهای سونامی برای زمین‌لرزه‌های دوردست، زمانی کافی برای زلزله‌شناس وجود ندارد که اطلاعات لرزه‌نگاری را بررسی کند و پیام هشدار را تنظیم تصحیح و ارسال نماید [۳].

¹lithosphere

²Tectonic plates

تاکنون رویکردهای مختلفی برای پیش بینی و اعلام هشدار زلزله بکار رفته است، رویکردهایی از قبیل انتقال داده بی‌سیم^۱، روشهای اندازه‌گیری ساده^۲، انتشار اکوستیک^۳، رویکرد مبتنی بر سامانه‌های میکرو الکترومکانیکی^۴، رویکرد مبتنی بر اینترنت اشیا^۵ و استفاده از سنسورهای شیب و جابجایی^۶ [۴].

یکی از این رویکردها که استفاده از آن به سرعت در حال گسترش است راه‌حل‌های مبتنی بر اینترنت اشیا است. اینترنت اشیا فناوری نوظهوری است که همه چیز را به اینترنت متصل می‌کند و به سرعت در حال گسترش است. این فناوری، فناوری جدیدی مانند نظارت بر بلایای طبیعی را به ارمغان می‌آورد [۵]. از آن سوی، عملکرد سیستم هشدار زودهنگام زلزله، اغلب با چگالی ایستگاه‌های آن مرتبط است. در زلزله شناسی، به دلیل نیاز بالای تراکم شبکه لرزه‌ای و پیچیدگی پردازش داده‌ها، توسعه سیستم هشدار اولیه زلزله^۷ زمان واقعی با کارایی بالا هنوز با چالش بزرگی مواجه است [۶]. استفاده از اینترنت اشیا و فناوری‌های مرتبط با آن می‌تواند قابلیت‌های این سیستم‌ها را افزایش دهد و ابزارهایی برای تجزیه و تحلیل، ذخیره و پردازش داده‌ها و همچنین نظارت کارآمد دستگاه‌ها فراهم کند.

از سوی دیگر، لرزه‌سنج‌های سنتی می‌توانند دقیقاً زلزله‌ها را ثبت کنند، اما قادر به پردازش آنها در محل برای راه‌اندازی مکانیسم هشدار و واکنش نیستند. در مقابل، دستگاه‌های اینترنت اشیا مجهز به شتاب‌سنج و پردازنده می‌توانند سیگنال‌های زلزله را در زمان واقعی ضبط و شناسایی کنند و پیام‌های هشدار را برای کاربران اطراف ارسال کنند [۷]. برای مثال، اخیراً دستگاه‌های تلفن همراه، مانند گوشی‌های هوشمند و دستگاه‌های اینترنت اشیا، با استفاده از شتاب‌سنج‌های داخلی خود برای شناسایی زمین‌لرزه‌ها با موفقیت مورد استفاده قرار گرفته‌اند [۸]. بدیهی است با گسترش و تراکم شتاب‌سنج‌های مبتنی بر اینترنت، دقت، سرعت و قابلیت اطمینان پیام‌های هشدار نیز افزایش می‌یابد. لذا دستگاه‌های اینترنت اشیا مجهز به شتاب‌سنج‌های کم‌هزینه، به عنوان ابزاری برای تشخیص زلزله در زمان واقعی پیشنهاد شده‌اند [۹]. همچنین بخش قابل توجهی از روش‌های پیش‌بینی زلزله بر اساس اطلاعات مربوط به زمین لرزه‌هایی است که قبلاً اتفاق افتاده است [۱۰]، لذا افزایش و تراکم در وسایل جمع‌آوری و ارسال داده‌ها با سرعت و دقت مناسب، بر عملکرد سیستم پیش‌بینی تاثیر خواهد داشت. چیزی که در تکنولوژی اینترنت اشیا بخوبی می‌توان از آن بهره برد.

در سال‌های اخیر، جامعه لرزه‌نگاری بر مطالعه دستگاه‌های کم‌هزینه به منظور ایجاد شبکه‌های پایش لرزه‌ای متراکم‌تر برای اجرای خدمات هشدار زودهنگام زلزله متمرکز شده است. شبکه‌های لرزه‌ای متراکم‌تر، زمان پاسخگویی سریع‌تر و دقت بالاتری را در تشخیص و مکان‌یابی زلزله ارائه می‌کنند [۱۱].

لذا در این مقاله، یک سیستم پیام‌رسانی و اعلام هشدار مبتنی بر اینترنت اشیا، با تکیه بر تراکم و افزونگی دستگاه‌های سنجش هشدار، پیشنهاد می‌شود. برای پیام‌رسانی، با توجه به شرایط ویژگی محیطی مختلف، پروتکل سبک وزن MQTT^۸ بکار برده می‌شود. برای افزایش دقت، سرعت، قابلیت اطمینان و کارایی سیستم پیام‌رسانی در مدل سه لایه‌ای پیشنهادی، افزونگی در حسگرهای اینترنت اشیا را هم در لایه حسگر و هم در لایه کنترلر خواهیم داشت.

در بخش دوم، برخی از کارهای مرتبط انجام شده در زمینه بکارگیری اینترنت اشیا در فرایند زلزله نگاری و پیام‌رسانی آورده شده است. در بخش سوم، به تشریح راه‌حل پیشنهادی برای مساله پیام‌رسانی زلزله پرداخته می‌شود. در قسمت اول آن، یک راهکار پایه پیام‌رسانی بر مبنای پروتکل MQTT^۸ ارائه می‌شود. در قسمت دوم به تشریح بکارگیری افزونگی در لایه حسگر سیستم پرداخته می‌شود. در قسمت سوم، افزونگی در لایه کنترلر را خواهیم داشت. در بخش چهارم، به شبیه‌سازی سیستم

¹wireless data transfer

²Simplified measuring methods

³Acoustic Emission

⁴MEMS based approach

⁵IoT based approach

⁶Using Tilt and Displacement Sensors

⁷Earthquake Early Warning

⁸Message Queuing Telemetry Transport

پرداخته می‌شود و نتایج حاصل از اجرای شبیه سازی در محیط متلب برای هر سه راهکار آورده می‌شود و نتایج مقایسه و بررسی می‌شود. در بخش پنجم و پایانی هم نتیجه‌گیری آورده می‌شود.

۲- تاریخچه

سارا مک براید و همکارانش [۳] به تشریح یک سیستم هشدار زود هنگام زلزله به نام shakealert در سواحل غربی ایالات متحده پرداخته است. سیستم ShakeAlert در میان دیگر پلتفرم‌های هشدار عمومی مانند سیستم عامل تلفن همراه، برنامه‌های تلفن هوشمند و سیستم مدیریت اضطراری فدرال یکپارچه هشدار و هشدار عمومی IPAWS را استفاده می‌کند. بسته به تراکم ایستگاه لرزه‌ای نزدیک کانون زلزله، فاصله بین مرکز زلزله و مکان کاربر و مسیر توزیع هشدار، هشدارها ممکن است قبل، در حین یا پس از رسیدن لرزش به یک مکان خاص دریافت شوند. لذا مدت هشدار که سیستم ShakeAlert می‌تواند ارائه دهد بسیار متغیر است و اغلب تنها چند ثانیه است. برای کاربرانی که در نزدیکی یک مرکز زلزله قرار دارند، هشدارها ممکن است پس از شروع لرزش قوی دریافت شود. آنها با بررسی داده‌ها بین محیط آزمایش کنترل‌شده و محیط واقعی، به بررسی آمار تأخیر پرداختند و دریافتند که با وجود تفاوت‌های زیاد در اندازه‌های جمعیت، تأخیرها پیام‌رسانی در هر دو محیط مشابه بوده است. آنان همچنین به بررسی کاربرد تلفن‌های همراه هوشمند و غیر هوشمند پرداختند و دریافتند که تلفن‌های غیر هوشمند مقرون به صرفه می‌توانند علایم هشدار را به عنوان گوشی‌های هوشمند سریع دریافت کنند. سارا مک براید و همکارانش [۱۲] همچنین به بررسی جنبه‌های دیگری از سیستم اعلام هشدار shakeAlert پرداخته اند. آنها در شش مرحله بررسی خود را انجام داده اند:

- ۱- ارزیابی عملکرد ShakeAlert و سرعت انتقال پیام‌ها،
- ۲- توصیف رفتار و پاسخ انسان به هشدارهای زلزله،
- ۳- ارائه درخت تصمیم برای صدور پیام‌های پس از هشدار،
- ۴- طراحی مجموعه‌ای حیاتی از سناریوهای پیام‌رسانی پس از هشدار،
- ۵- شرح و بسط این سناریوها با الگوهای پیام برای انواع کانال‌های ارتباطی،
- ۶- توسعه یک نوع شناسی هشدارهای زلزله.

آنها همچنین روش‌هایی را برای نظارت و ارزیابی پیام‌های پس از هشدار برای بهبود مستمر سیستم بررسی کرده‌اند. جیانهونگ لیانگ و همکارانش [۱] یک مطالعه مبتنی بر شبکه اینترنت اشیا مرتبط با تشخیص زلزله انجام داده‌اند. اکثر مدل‌های قبلی نتوانستند بین زلزله و سایر صداهای ارتعاشی خارجی که ممکن است به دلیل ساخت و ساز یا سایر منابع خارجی ایجاد شوند، تمایز قائل شوند. آنها تحلیل ساختاری عمیق روی ساختمانی که حسگرها باید در آن قرار گیرند، انجام دادند. سپس حسگرهای مختلف و خواص و کارایی آنها در تشخیص زلزله را به تفصیل توضیح داده‌اند. از سه مدل یادگیری ماشین: رگرسیون لجستیک^۱، ماشین بردار پشتیبان^۲ و شبکه عصبی کانولوشنی^۳ استفاده شد و نتیجه‌گیری شد که مدل شبکه عصبی بالاترین دقت را دارد.

رستم پیرماگومدوف و همکارانش [۱۰] یک سیستم نظارت بر رفتار حیوانات برای پیش بینی زلزله با استفاده از اینترنت اشیا ارائه کرده‌اند. این سیستم از حسگرهای اینرسی و بینایی رایانه‌ای برای جمع‌آوری داده‌ها در مورد رفتار حیوانات استفاده می‌کند. پردازش داده‌ها و تجزیه تحلیل داده‌ها بر روی سرور مرکزی انجام می‌شود. آنها از دستگاه جمع‌آوری داده استفاده کرده‌اند. این دستگاه شامل یک شتاب‌سنج، یک ژيروسکوپ، یک بسته باتری عظیم و یک میکروکنترلر NodeMCU است که یک مشتری^۴ MQTT است. سروری که داده‌ها روی آن پردازش می‌شود نیز یک مشتری MQTT بوده و آن را از طریق کارگزار MQTT دریافت کرده است.

¹Logistic Regression

²Support Vector Machine (SVM)

³Convolutional neural network

⁴Client

کانیکا ساینی و همکارانش [۱۲] در تحقیق خود، چارچوب نظارتی و پیش‌بینی زلزله هوشمند مبتنی بر اینترنت اشیا با تطابق مه و محاسبات ابری پیشنهاد داده‌اند. آنها از اینترنت اشیا برای جمع‌آوری داده‌ها از حسگرها و انتقال آن به لایه مه، برای پیش‌پردازش، استخراج ویژگی، انتخاب و طبقه‌بندی با استفاده از جنگل تصادفی استفاده کرده‌اند. علاوه بر این، از سیستم استنتاج فازی عصبی تطبیقی^۱ برای پیش‌بینی بزرگی زلزله در لایه ابر استفاده شده است. در این تحقیق، یک مدل سه لایه ای برای مانیتورینگ داده‌های زلزله پیشنهاد شده است از جمله لایه سنجش داده، لایه مه، لایه ابری ارتباطی. آنان در تحقیق خود دریافته‌اند که اگر داده‌ها نزدیک به جایی که به دست می‌آیند پردازش شوند، تأخیر را می‌توان کاهش داد. بعلاوه اظهار داشته‌اند که یک اینترنت اشیا یکپارچه همراه با ترکیب محاسباتی مه-ابر می‌تواند برای نظارت و پیش‌بینی زمین لرزه‌ها کارآمدتر و مؤثرتر مورد استفاده قرار گیرد.

آنا ماریا زامبرانو و همکارانش [۱۳] یک معماری مبتنی بر اینترنت اشیا برای سیستم اعلام هشدار زلزله پیشنهاد کردند. آنها گوشی‌های هوشمند را به عنوان دروازه‌ای برای انتقال اطلاعات از حسگرهای تعبیه‌شده‌شان مانند شتاب‌سنج پیشنهاد کردند. معماری پیشنهادی برای ادغام و پردازش داده‌های جمع‌آوری شده، با امکان ترکیب سنسورهای دیگر خارج از تلفن‌های هوشمند، مانند لرزه‌نگارها و تاریخ تولید در سکوی هماهنگ‌سازی اعلام هشدار است. این سیستم در یک محیط شبیه‌سازی شده آزمایش شده است تا آن را آموزش دهد و موارد کاذب را حذف کند و سیستم‌های هشدار اولیه از این نوع را بهبود بخشد. معماری پیشنهادی شامل شبکه شتاب‌نگار سلسله مراتبی سه لایه برای سیستم اعلام هشدار زلزله است. در لایه اول، تلفن‌های هوشمند به عنوان واحدهای پردازش استفاده می‌شوند و نمونه‌ها را به سرور میانی مربوط به لایه ارسال می‌کنند. در لایه دوم به محض اینکه تلفن‌های هوشمند پس از غلبه بر فرآیندی که به طور خاص طراحی شده است، یک قله لرزه‌ای را تشخیص دهد. هر تلفن هوشمند تصمیم می‌گیرد که آیا یک رویداد لرزه‌ای وجود داشته است یا خیر، و بلافاصله به کاربران خود اطلاع می‌دهد و در همان زمان، حادثه را به مرکز کنترل لایه سوم، اطلاع می‌دهد.

یانت چاوز ریورا و همکارانش [۱۴] یک سیستم مبتنی بر آردوینو ارائه داده‌اند که قادر به اندازه‌گیری، ثبت و انتقال داده‌های هواشناسی، اینرسی و موقعیت‌یابی در زمان واقعی از مکان‌های دوردست است که قادر به جمع‌آوری داده‌ها برای هشدار زلزله و برای نظارت بر محیط زیست است. این سیستم شامل حسگرهایی شتاب‌سنج، ژيروسکوپ، دماسنج، مغناطیس سنج، مکان‌یاب، فشارسنج، رطوبت‌سنج، اشعه ماوراء بنفش و سنسور کیفیت هوا برای تعیین آب و هوا یا رویدادهای حرکتی غیرعادی به عنوان زلزله در مکان‌های دور افتاده است. سیستم جاسازی شده را می‌توان به Raspberry Pi متصل کرد تا داده‌ها را از طریق پروتکل MQTT و پروتکل انتقال ابرمتن^۲ انتقال دهد. اطلاعات را می‌توان توسط هر دستگاه متصل به اینترنت به بازبازی کرد. همچنین، این سیستم از دو دستگاه اصلی تشکیل شده است: سیستم IAAPP-MET 1 و Raspberry Pi 3. هر دو برای اندازه‌گیری، ذخیره و ارسال داده‌ها از طریق پروتکل‌های MQTT یا HTTP با هم کار می‌کنند.

پایولو پیرلیونی و همکارانش [۱۱] یک دستگاه هشدار اولیه مبتنی بر اینترنت اشیا را بر اساس فناوری سیستم‌های الکترومکانیکی پیشنهاد و ارزیابی کرده‌اند. آنها همچنین پیشنهاد ادغام دستگاه در معماری اینترنت اشیا برای تشخیص رویداد، نظارت بر دستگاه و قابلیت انتشار هشدار ارائه می‌کند. آنها با ارزیابی نتایج خود بیان داشتند که عملکرد سیستم هشدار زود هنگام زلزله اغلب با چگالی ایستگاه‌های آن مرتبط است. استفاده از اینترنت اشیا و فناوری‌های ابری می‌تواند قابلیت‌های این سیستم‌ها را افزایش دهد و ابزارهایی برای تجزیه و تحلیل، ذخیره و پردازش داده‌ها و همچنین نظارت کارآمد دستگاه‌ها فراهم کند. علاوه بر این، پیشرفت‌های فناوری در سیستم‌های میکرو الکترومکانیکی امکان ایجاد دستگاه‌های پایش لرزه‌ای کم‌هزینه و کوچک را فراهم کرده است که می‌تواند برای ایجاد شبکه‌های لرزه‌ای متراکم‌تر مورد استفاده قرار گیرند. در نهایت نتایج ارزیابی عملکرد نشان می‌دهد که این دستگاه قادر است رویدادهایی با بزرگی بیشتر از ۴/۱ ریشتر و در فاصله کمتر از ۳۰ کیلومتری را تشخیص دهد.

سیونگ کیونگ کیم و همکارانش [۸] یک سیستم اعلام هشدار مبتنی بر شتاب‌سنج‌های ارزان قیمت اینترنت اشیا با تأکید بر حل مشکل نویزهای ناخواسته پیشنهاد کرده‌اند. آنها دریافته‌اند که در محیط مورد بررسی سیگنال‌های ثبت‌شده در دستگاه‌های

¹Adaptive Neural Fuzzy Inference System

²Hyper Text transfer Protocol (HTTP)

اینترنت اشیا به دلیل دو عامل اصلی نويز دارند: ساختمان‌ها و سازه‌های شهری که این دستگاه‌ها در آن نصب می‌شوند و مبادله هزینه و کیفیت آنها. بنابراین، در این کار، مکانیزمی برای مقابله با مشکل هشدارهای کاذب در دستگاه‌های اینترنت اشیا ارائه می‌شود. آنها شبکه عصبی مصنوعی پیشنهادی خود را با اندازه‌های پنجره و ویژگی‌های مختلف از ۲ ثانیه تا ۶ ثانیه و با شدت‌های مختلف زلزله آزمایش کرده و دریافته‌اند که تنظیم اندازه پنجره و ویژگی در یک بازه زمانی خاص (یعنی ۴-۵ ثانیه) می‌تواند عملکرد مدل را بهبود بخشد. علاوه بر این، یک سکوی هدایت مسیر تخلیه که موقعیت کاربر را در نظر می‌گیرد پیشنهاد شده است. سکوی پیشنهادی از طریق ارتباط بین سرور و دستگاه‌های کاربر، اطلاعات را به دستگاه‌های کاربر در زمان واقعی ارائه و تجسم می‌کند. در صورت بروز فاجعه، پناهگاه‌های امن بر اساس اطلاعات وارد شده از سرور انتخاب می‌شوند و مسیرهای عابر پیاده ارائه می‌شود.

ونیتا بابو و ویتنوراجا [۵] یک سیستم پیشنهادی مبتنی بر فناوری اینترنت اشیا برای تجزیه و تحلیل زمان واقعی سیل و زلزله ارائه داده و بیان داشته‌اند که این سیستم می‌تواند مناطق آسیب دیده سیل و زلزله را نظارت کند. این سیستم رصدخانه سیل و زلزله را به عنوان یک سیستم هشدار و هشدار برای نظارت موثر بر مناطق بحرانی مستعد سیل و زلزله در زمان واقعی بدون هزینه و اقدامات ایمنی ارایه می‌کند. سیستم پیشنهادی همچنین به مقامات در مورد حضور یک انسان در منطقه هشدار می‌دهد. همچنین برای مواقع اضطراری با استفاده از انرژی خورشیدی منبع پشتیبان تهیه می‌کند. طراحی سیستم پیشنهادی شامل یکپارچه‌سازی حسگرها به میکروکنترلر، فرستنده رادیو فرکانسی^۱ و گیرنده برای ارتباطات دوربرد و سکوی اینترنت اشیا برای بررسی و تجسم مقادیر سنسور آلود شده است.

آمینگ وو و همکارانش [۷] در تحقیق خود، یک سیستم تشخیص زلزله تحت شبکه، با نام CrowdQuake با سنسور شتاب سیمد گوشی هوشمند و یک مدل تشخیص زلزله مبتنی بر یادگیری عمیق را ارائه کردند. برای یک سال عملیات، این سیستم مجموعه‌ای از زمین لرزه‌ها را شناسایی کرده و داده‌های مختلف زلزله و غیرزلزله را جمع‌آوری کرد. سپس آنها در مورد چگونگی گسترش آن در سراسر کشور کره جنوبی چالش‌های زیر مورد بررسی قرار دادند: (۱) استقرار حسگر برای شبکه بسیار متراکم، (۲) عملکرد تشخیص زلزله با استفاده از یک مدل یادگیری عمیق، و (۳) طراحی سیستم با کارایی بالا و مقیاس‌پذیر برای پردازش داده‌های بزرگ. این سیستم بهبود یافته توانست داده‌های ارسال شده از ۸۰۰۰ حسگر اینترنت اشیا را پیام‌رسانی کند و با استفاده از یک مدل تشخیص جدید پیشنهادی، زلزله را در چند ثانیه تشخیص دهد. علاوه بر این، سیستم پیشنهادی تمام داده‌های شتاب ارسال شده از سنسورها را ذخیره کرده و سطوح نويز آنها را ارزیابی کرده است. بعلاوه داده‌های جمع‌آوری شده برای آموزش مدل یادگیری عمیق استفاده شده است.

ارشاد خان و همکارانش [۹] در تحقیق خود یک رویکرد ارائه کرده‌اند که با استفاده از چندین گوشی هوشمند واقع در یک منطقه نزدیک، زلزله را شناسایی می‌کند تا توانایی تشخیص زلزله رویکرد مستقل بدون زیرساخت‌های سیستم و شبکه را بهبود بخشد. در این تحقیق، گوشی‌های هوشمند واقع در یک منطقه جغرافیایی نزدیک، یک شبکه لرزه‌نگاری ایجاد می‌کنند تا زلزله‌ها را تشخیص دهند. هنگامی که تلفن هوشمند با استفاده از الگوریتم تشخیص زلزله بر اساس یک شبکه عصبی، حرکتی شبیه به زلزله را تشخیص می‌دهد، نتیجه تشخیص را برای گوشی‌های هوشمند مجاور ارسال می‌کند. پس از دریافت نتایج تشخیص از گوشی‌های هوشمند مجاور، هر گوشی هوشمندی که در شبکه لرزه‌نگاری شرکت می‌کند، یک فرآیند تصمیم‌گیری را انجام می‌دهد و زلزله را تأیید می‌کند و سپس یک هشدار را به صورت لحظه‌ای اعلام می‌کند.

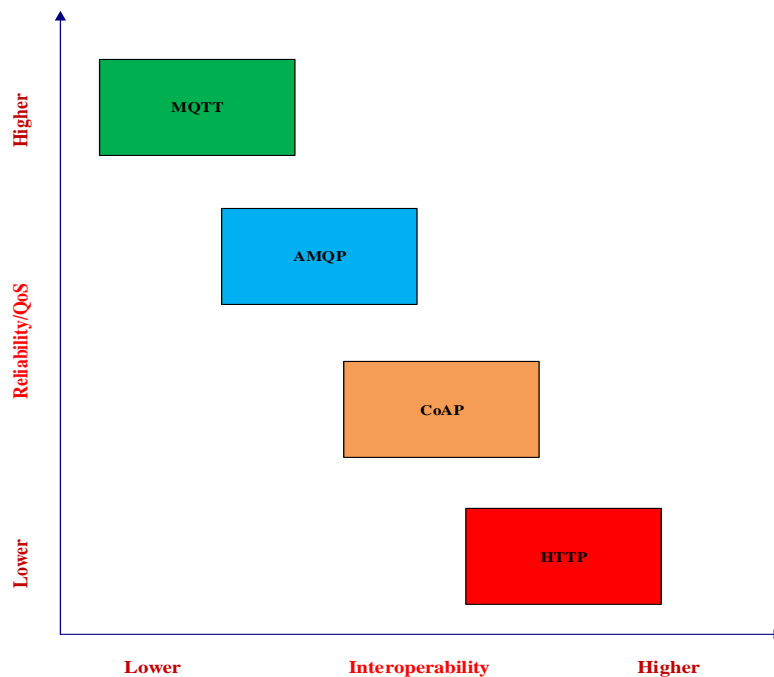
پیتر بوکادورو و همکارانش [۱۵] در تحقیق خود یک سیستم مانیتورینگ زلزله و آب و هوا مبتنی بر اینترنت اشیا بنام quakesense را معرفی می‌کنند. این سیستم از دو فناوری MQTT بهره می‌برد و ادعا می‌کند که امکان مانیتورینگ تقریباً بلادرنگ در زمان واقعی برای اعلان رویدادهای لرزه‌نگاری از طریق یک رابط مبتنی بر وب فراهم می‌کند.

¹RF

۳- روش پیشنهادی

زمین لرزه از پیچیده‌ترین و مخرب‌ترین بلایای طبیعی است که انسان با آن مواجه می‌شود. در نتیجه، پیش بینی زلزله یک کار چالش برانگیز و حیاتی است. پیش‌بینی مؤثر و اعلام هشدار برای زلزله این پتانسیل را دارد که تخریب زلزله را به میزان قابل توجهی به حداقل برساند [۲]. لذا هر گونه تلاش در جهت کاهش تاخیر و افزایش قابلیت اطمینان در سیستم پیام‌رسانی و اعلام هشدارهای داده‌های لرزه‌نگاری مفید و کارا خواهد بود. از آن سوی سیستم‌های موجود برای پیش، تشخیص و هشدار اولیه این زمین لغزش‌ها از قبیل تداخل سنجی ماهواره‌ای راداری، اسکن لیزری، تصویربرداری با وضوح بالا از طریق ماهواره‌ها و شبکه‌های حسگر ژئوفیزیک یا برای استقرار در مناطق وسیع بسیار گران هستند یا دقت کمتری دارند یا فاقد ویژگی‌های بلادرنگ مورد نیاز برای تشخیص زمین لغزش هستند [۱۳]. لذا، در سیستم‌های مانیتورینگ داده، به رغم مزایا و ویژگیها، یکی از موضوعات مورد توجه و چالش برانگیز قابلیت اطمینان بوده است [۱۶، ۱۷].

از طرفی گستردگی روزافزون کاربرد شبکه‌های مانیتورینگ که عموماً از نوع بیسیم هستند، لزوم استفاده از پروتکل‌های سبک وزن که مصرف انرژی پایینی نیز دارند را دو چندان کرده است. این موضوع بطور خاص در محیط‌های مختلف و متنوع نمود بیشتری پیدا می‌کند [۱۸]. با بررسی و مقایسه پروتکل‌ها می‌بینیم که در بین پروتکل‌های موجود برای ارتباطات شبکه حسگر گسترده که مستلزم استفاده از حسگرهای با پهنای باند پایین و توان مصرفی کم است، به نحوی که تبادل اطلاعات و پیام حتی‌الامکان به صورت قابل اطمینان و بلادرنگ بر مبنای اینترنت اشیا باشد پروتکل MQTT پروتکلی مناسب است [۱۹-۲۱]. شکل ۱، مقایسه‌ای بین پروتکل MQTT با سه پروتکل پیام‌رسانی AMQP^۱، CoAP^۲ و HTTP را نشان می‌دهد. همانطور که از شکل پیداست، پروتکل MQTT دارای بالاترین قابلیت اطمینان-کیفیت سرویس است. لازم به یادآوری است که این پروتکل دارای سه سطح از کیفیت سرویس است و از پروتکل اتصال‌گرای TCP به عنوان پروتکل حمل و نقل استفاده می‌کند.



شکل ۱: مقایسه قابلیت اطمینان پروتکل MQTT با پروتکل‌های AMQP، CoAP و HTTP [۲۰]
CoAP and HTTP [20]. Figure 1. Comparison of reliability of MQTT with AMQP

لذا با بررسی و مقایسه این پروتکل‌های پیام‌رسانی موجود برای ارتباطات شبکه سنسوری گسترده که مستلزم استفاده از حسگرهای با پهنای باند پایین و توان مصرفی کم است به نحوی که تبادل اطلاعات و پیام حتی‌الامکان به صورت قابل اطمینان

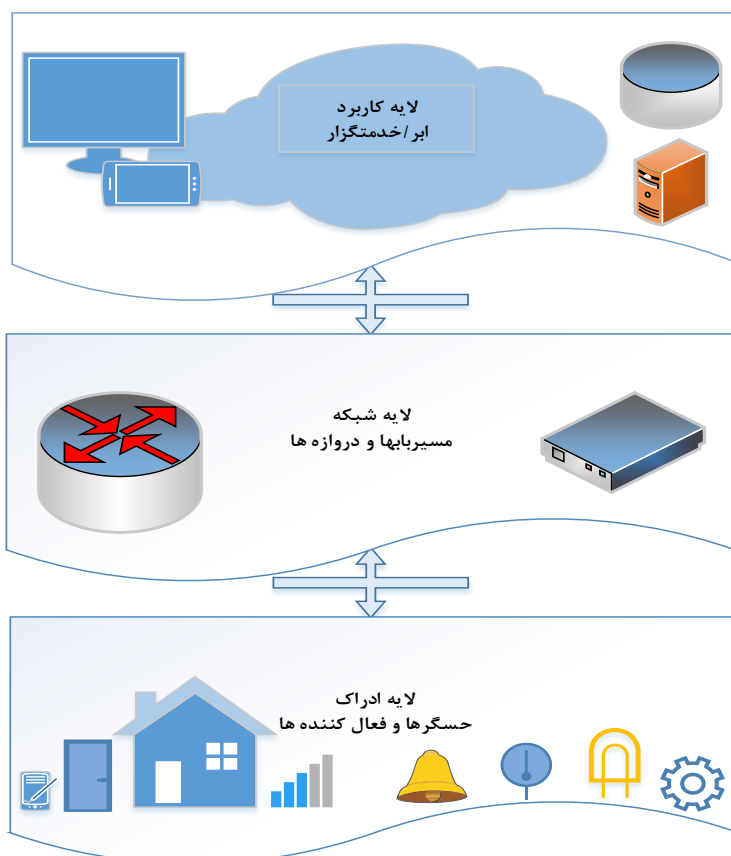
^۱Advanced Message Queuing Protocol

^۲Constrained Application Protocol

و بلادرنگ بر مبنای IoT^۱ باشد پروتکل مناسب انتخابی MQTT است. بنابراین با توجه به اینکه محدوده مورد تحقیق ما که شبکه گسترده‌ای از حسگرهاست که در مقیاس بزرگ جغرافیایی نسبت به تبادل اطلاعات و مانیتورینگ می‌پردازند، این پروتکل انتخاب شده است.

از سوی دیگر، با توجه به گستردگی شبکه مورد مطالعه و شرایط مختلف محیطی، هر یک از عناصر شبکه در معرض خرابی و در نتیجه کاهش قابلیت اطمینان هستند. از طرفی، هرچند که این پروتکل در حالت کلی از قابلیت اطمینان بالایی برخوردار است اما در این پروتکل با تعریف سه سطح از کیفیت سرویس، رسیدن به قابلیت اطمینان بالاتر منجر به تاخیر انتشار نیز می‌شود که این با بلادرنگی سیستم در تقابل است.

لذا ما به دنبال کاهش تاخیر و افزایش قابلیت اطمینان و کارایی سیستم پیام‌رسانی از طریق ایجاد افزونگی در لایه حسگر و کنترلر سیستم پیام‌رسانی مبتنی بر اینترنت اشیا بر مبنای پروتکل پیام‌رسانی سبک وزن MQTT هستیم و پیشنهاد انجام اصلاحاتی برای بهبود عملکرد این پروتکل در قالب سه راهکار هستیم. برای پیام‌رسانی نیز، از بین معماری‌های چند لایه از قبیل معماری سه لایه، چهار لایه و پنج لایه، با توجه شرایط محیط مورد نظارت و به جهت سادگی عملکرد و کاهش سربار سیستم، معماری سه لایه را پیشنهاد می‌دهیم. در شکل ۲ معماری سه لایه پیشنهادی برای پیام‌رسانی آمده است.



شکل ۲: مدل سه لایه ای پیشنهادی سیستم مانیتورینگ پیام‌رسانی مبتنی بر اینترنت اشیا بر مبنای پروتکل MQTT

Figure 2. The proposed three-layer model of the messaging monitoring system based on the Internet of Things on the MQTT protocol

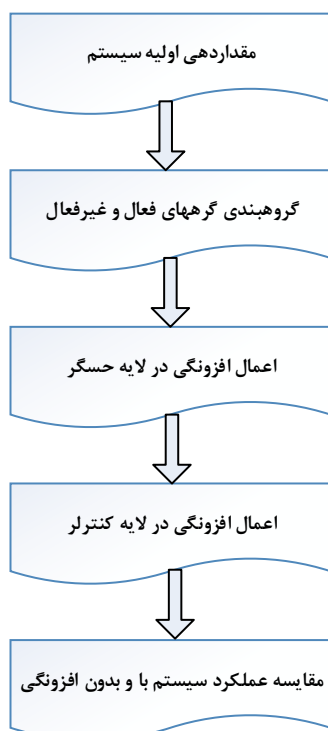
همانگونه که در شکل ۲ آمده است، در لایه پایینی این مدل اشیای مختلف حسگر قرار دارند که وظیفه جمع‌آوری داده‌های مختلف مورد نظر سیستم را بر عهده دارند و بایستی این داده‌ها را بصورت بلادرنگ به لایه بالاتر ارسال کنند. این اشیای حسگرهایی هستند که بر مبنای تکنولوژی اینترنت اشیا متصل شده‌اند؛ که می‌تواند نقاط مختلف محیطی تعبیه شده باشد. لایه دوم و میانی لایه کنترلر است که در واقع متناظر با بروکر^۲ در پروتکل MQTT است که وظیفه انجام عملیات پیام‌رسانی داده‌ها از اشیای لایه

¹Internet of Things

²broker

حسگر تحت پوشش خود را دارد. داده‌ها از لایه کنترلر به لایه بالایی کاربرد ارسال می‌شود. در واقع بروکرها واسطه‌های میانی هستند که پیام‌های دریافتی از حسگرها را پس از جمع‌آوری و پایش و مانیتور به لایه کاربرد، که ممکن است در محل دیگری واقع باشد ارسال و تبادل می‌کند. در لایه کاربرد، داده‌های دریافتی از کنترلرهای مختلف مورد ارزیابی و تجزیه و تحلیل و تصمیم‌گیری قرار می‌گیرد و هشدارهای لازم صادر می‌شود. برای پیاده‌سازی این سیستم می‌توان از ماژول‌های آردوینو^۱ مثل Raspberry Pi3 استفاده کرد.

بنابراین، با توجه به توضیحات قبل در خصوص ضرورت بهبود عملکرد و قابلیت اطمینان سیستم پیام‌رسانی و کاهش تاخیر انتشار و نیز توجه به معماری سه لایه پیشنهادی برای پیام‌رسانی، روالی برای کاهش تاخیر و افزایش قابلیت اطمینان و کارایی سیستم طبق شکل ۳ پیشنهاد شده است.



شکل ۳: روال پیشنهادی برای بهبود عملکرد سیستم پیام‌رسانی زلزله

Figure3. Proposed procedure to improve the performance of the earthquake messaging system

در ابتدا سیستم مانیتورینگ را در سه لایه حسگر، کنترلر و کاربرد با مقادیر مشخص پیاده می‌کنیم. سپس در راهکار اول، پروتکل MQTT را برای پیام‌رسانی بکار برده و به عنوان مبنایی برای مقایسه با سایر راهکارها، افزونگی در سیستم پیام‌رسانی نداریم؛ بلکه پیشنهاد می‌شود به جهت کاهش مصرف انرژی، گره‌ها به دو دسته گره فعال و گره آماده‌باش^۲ تقسیم شوند. تقسیم گره‌ها به دو دسته فعال و غیرفعال باعث صرفه جویی در مصرف انرژی توسط حسگرهای محیط می‌شود. در راهکار دوم، به جهت پوشش بهتر محیط و پوشش گره‌های خراب احتمالی، افزونگی در لایه حسگر را خواهیم داشت، بطوری‌که تعداد حسگرها را در نقاط مختلف محیط مورد بررسی، افزایش می‌دهیم. استفاده از سنسورهای بیشتر در لایه حسگر، علاوه بر اینکه باعث پوشش گره‌های خراب و ناحیه‌های خرابی می‌شود، دقت و تعداد نمونه‌های اندازه‌گیری را افزایش می‌دهد. در راهکار سوم، برای افزایش قابلیت اطمینان و کارایی رویکرد افزونگی در لایه کنترلر پیشنهاد می‌شود تا در صورت خرابی کنترلرهای سیستم و یا ایجاد نواحی خرابی تحمل‌پذیری خطا افزایش یابد. در نهایت نیز، این سه راهکار را از جنبه‌های مختلف مورد بررسی، مقایسه و ارزیابی قرار می‌دهیم.

¹arduino

²standby

۳-۱- راهکار اول

با توجه به شرایط محیطی و گستردگی سیستم مانیتورینگ، عناصر سیستم از جمله اشیای حسگر و یا کنترلرها ممکن است در معرض خرابی قرار گیرند و لذا در زمان پاسخ مناسب، نتوانند نسبت به تبادل پیام اقدام کنند و قابلیت اطمینان سیستم تحت تاثیر قرار گیرد. خرابی اشیای حسگر از طریق بکارگیری تعداد زیاد و مناسب آنها پوشش داده می‌شود. از طرفی، گستردگی محیط مورد پایش و تعداد محدود اشیای سیستم باعث افزایش تاخیر در سیستم پیام‌رسانی و کاهش کارایی خواهد شد. لذا در ابتدا یک راهکار بدون افزونگی پیشنهاد می‌شود که البته می‌تواند مبنای مناسبی نیز برای مقایسه با سایر راهکارهای پیشنهادی باشد.

در حالت پیش فرض که میزان خطای داده‌ها و نقص لینک‌های ارتباطی کم است، داده‌های مربوط به زلزله‌نگاری توسط n درصد از حسگرهای مستقر شده در محیط حس^۱ می‌شود. گره‌ها پس از تشخیص رویداد در محیط، داده را به کنترلر ارسال می‌کنند. کنترلر نیز داده را در صورتی که تکراری نباشد، به ایستگاه اصلی از طریق لینک‌های ارتباطی ارسال می‌کند.

روش کار به این صورت است که با توجه به میزان خطای شبکه و سطوح مختلف کیفیت سرویس، تعدادی از گره‌ها در حالت پایش فعال و سایرین برای کاهش مصرف انرژی در حالت حداقل انرژی مصرفی (حالت خواب) قرار می‌گیرند [۲۲]. یکی از تکنیک‌های بهینه‌سازی مصرف انرژی، زمان‌بندی خواب و بیدار گره‌های حسگر است [۲۳، ۲۴]. در این روش، گره‌ها بصورت سازگار شونده ناحیه تحت پوشش خود را بر اساس پارامترهای کیفیت سرویس تغییر می‌دهند. تکنیک‌های به حالت خواب بردن، با هدف صرفه جویی در انرژی به وسیله خاموش کردن برخی از گره‌ها در پریودهای زمان‌بندی برای حفظ انرژی گره‌ها است. در این تکنیک، برای تعیین گره فعال از بین گره‌های موجود، یک رتبه‌بندی بر اساس میزان انرژی باقیمانده [۲۵] و نرخ تشخیص رویداد در محل استقرار گره با استفاده از الگوریتم فازی انجام می‌شود و همواره سعی بر این است که گره‌هایی که انرژی مصرفی آنها کمتر از سایرین است و احتمال وقوع رخداد در محیط استقرار آن بیشتر است، انتخاب شوند. با این کار می‌توان نرخ پوشش را افزایش و مجموع انرژی مصرفی را در شبکه کاهش داد.

در حالت کلی، انرژی مصرفی در گره حسگر در یک چرخه انتقال پیام، طبق رابطه زیر از مجموع انرژی مصرفی برای انتقال و انرژی مصرف شده در حالت بیکار به دست می‌آید.

$$E_{total} = E_{tx} + E_{idle} \quad (1)$$

که در آن E_{total} انرژی مصرفی کل، E_{tx} انرژی انتقال و E_{idle} انرژی مصرفی در گره حسگر در حالت بیکار است که معمولاً مقداری ثابت است و به فاصله بستگی ندارد. انرژی انتقال که مقدار انرژی است که یک گره حسگر مصرف می‌کند تا داده‌ها را در فاصله معینی انتقال دهد با توان دوم فاصله نسبت دارد و از رابطه زیر قابل محاسبه است.

$$E_{tx} = E_{elec} \times L + E_{fs} \times L^2 \quad (2)$$

که در آن E_{elec} انرژی مورد نیاز برای راه اندازی گره فرستنده-گیرنده است. L فاصله انتقال است. E_{fs} انرژی مورد نیاز هر بیت برای انتقال از طریق کانال فضای آزاد برای انتقال است که معمولاً تابعی از، از دست دادن مسیر است.

۳-۲- راهکار دوم

بر اثر افزایش وقوع خطا در لینک‌های ارتباطی یا گره‌های حسگر، دقت داده‌های تجمیع شده کاهش یافته می‌یابد. لذا ایجاد افزونگی در حسگرها، برای پوشش بهتر محیط راهگشاست. بنابراین در راهکار دوم، این گره‌های اضافی بر اساس نرخ وقوع خطا در بخش‌های مختلف شبکه، به گره‌های اولیه شبکه اضافه می‌شوند و به عنوان گره‌های رله در نظر گرفته می‌شود. بنابراین راهکار دوم، مربوط به مکان‌یابی گره‌های رله در شبکه پایش داده‌های زلزله‌نگاری در بستر اینترنت اشیاء است؛ به نحوی که بتوان با استقرار گره‌های رله در مناطقی که حسگرها دچار خطا شده‌اند، مقاوم‌پذیری سیستم را افزایش داد [۲۵].

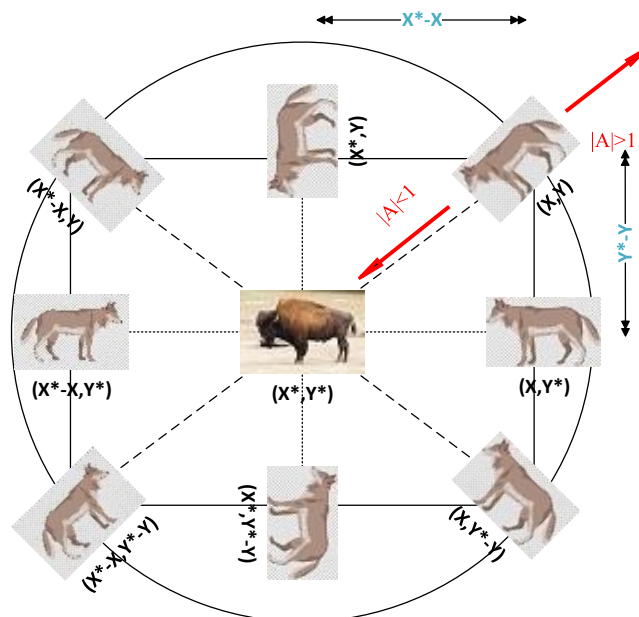
انتخاب بهینه گره‌های رله، یک انتخاب چند متغیره است. به همین منظور یکی از سخت‌ترین چالش‌ها، نحوه انتخاب این گره‌ها از بین گره‌های موجود است [۲۶، ۲۷]، چون در انتخاب یک گره رله، پارامترهای زیادی مانند مجموع انرژی باقیمانده

¹sense

گره‌های حاضر در بلوک و همچنین نرخ خرابی تجهیزات حسگر در بلوک‌های مختلف شبکه وجود دارند، لذا انتخاب گره رله یک مساله سخت^۱ است. این در حالی است که انتخاب گره رله، با روش‌های ریاضی نیز ممکن است، اما در شبکه‌های بزرگ می‌تواند بسیار زمان‌گیر باشد. با بررسی روش‌های مختلف انتخاب گره رله و همچنین بررسی پارامترهای مؤثر و حذف پارامترهای غیرضروری در این زمینه، سعی در انتخاب مناسب الگوریتم بهینه انتخاب گره رله شبکه حسگر بیسیم است. بنابراین در این مرحله، با استفاده از روش بهینه‌سازی گرگ خاکستری^۲ [۲۸]، مجموعه بهینه‌ای از گره‌های رله در شبکه حسگر بیسیم انتخاب می‌شود، بطوری‌که قابلیت اطمینان سیستم با اضافه شدن این گره‌های رله (برای مواقع خرابی) افزایش یابد.

در الگوریتم خاکستری، چهار نوع گرگ بنام گرگ‌های آلفا^۳ که رهبران گروه هستند، بتا^۴ و دلتا^۵ که به رهبران مشاوره و راهنمایی می‌دهند و امگا^۶ که گره‌های معمولی و زیر دست هستند، وجود دارد. الگوریتم شامل سه گام اصلی شکار گرگ‌های خاکستری می‌باشد که عبارتند از: جستجو برای طعمه، محاصره طعمه و در نهایت حمله به طعمه است [۲۹، ۳۰].

گرگ‌های خاکستری، توانایی تخمین موقعیت شکار را دارند. در جستجوی اولیه هیچ ایده‌ای در مورد موقعیت شکار وجود ندارد. فرض می‌شود گرگ‌های آلفا، بتا و دلتا دانش اول بهتری در خصوص موقعیت شکار (نقطه بهینه جواب که در اینجا همان نقطه خرابی احتمالی گره حسگر هستند) دارند. در واقع گرگ‌های آلفا، بتا و دلتا موقعیت شکار (گره) را تخمین می‌زنند، اما بقیه گرگ‌ها موقعیت خود را بطور تصادفی حول شکار به روز رسانی می‌کنند. از طرفی موقعیت سه جواب برتر همواره حفظ می‌شود. وقتی شکار توسط گرگ‌ها احاطه شده و از حرکت بایستد حمله به رهبری گرگ آلفا شروع می‌شود. مطابق شکل ۴، مدل کردن این فرایند با استفاده از کاهش بردار A انجام می‌شود. اگر $|A| < 1$ باشد، گرگ آلفا به شکار (و بقیه گرگ‌ها) نزدیک می‌شود و اگر $|A| > 1$ گرگ آلفا از شکار (و بقیه گرگ‌ها) دور خواهد شد. سایر گرگ‌ها، موقعیت خود را برحسب موقعیت گرگ‌های آلفا، بتا و دلتا به‌روزرسانی کنند. فرایند جستجو پروسه‌ای دقیقاً عکس فرایند حمله دارد. در هنگام جستجو گرگ‌ها از یکدیگر دور می‌شوند تا شکار را ردیابی کنند ($|A| > 1$) در حالی که پس از ردیابی شکار، گرگ‌ها در فاز حمله به یکدیگر نزدیک می‌شوند ($|A| < 1$). به این پروسه واگرایی در جستجو - همگرایی در حمله می‌گویند.



شکل ۴: مکانیزم به‌روزرسانی موقعیت عامل‌های جستجو و تاثیر A بر روی آن [۳۱]

Figure 4. The mechanism of updating the position of search agents and the effect of A on it [31]

¹NP-HARD

²Grey Wolf Optimizer

³alpha

⁴beta

⁵delta

⁶omega

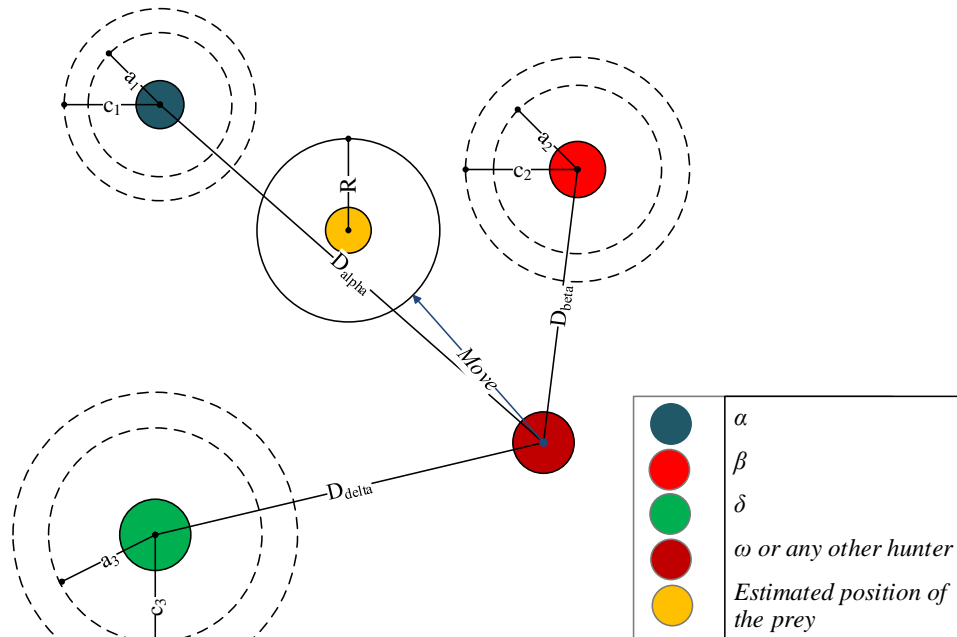
در هر تکرار الگوریتم، برازندگی کلیه جواب‌ها محاسبه شده و سه جواب برتر آلفا، بتا و دلتا انتخاب می‌شوند. با تعیین موقعیت این سه جواب، به‌روز رسانی موقعیت سایر گرگ‌ها به تبعیت از آن‌ها و بر اساس روابط ۳ و ۴ و ۵ انجام می‌شود. در پایان تکرارها، موقعیت گرگ آلفا به عنوان نقطه بهینه برای جایگذاری گره رله معرفی می‌شود [۳۰،۳۱].

$$\overline{D}_\alpha = |\overline{C}_1, \overline{X}_\alpha - \overline{X}|, \overline{D}_\beta = |\overline{C}_2, \overline{X}_\beta - \overline{X}|, \overline{D}_\delta = |\overline{C}_3, \overline{X}_\delta - \overline{X}| \quad (۳)$$

$$\overline{X}_1 = \overline{X}_\alpha - \overline{A}_1, (\overline{D}_\alpha) \quad \overline{X}_2 = \overline{X}_\beta - \overline{A}_2, (\overline{D}_\beta) \quad \overline{X}_3 = \overline{X}_\delta - \overline{A}_3, (\overline{D}_\delta) \quad (۴)$$

$$Fit(sol_u) = \frac{T_{error}(sol_u)}{\sum_{i \in B} Eng_i} \quad (۵)$$

شکل ۵ به‌روز رسانی موقعیت گرگ‌های آلفا، بتا و دلتا را بر روابط ۳ و ۴ و ۵ نمایش می‌دهد.



شکل ۵: به‌روز رسانی موقعیت در الگوریتم بهینه‌سازی گرگ خاکستری [۲۹،۳۰]
Figure 5. Updating the position in the gray wolf optimization algorithm [29,30]

متغیر تصمیم‌گیری و تعیین‌کننده میزان برآزش راه‌حل ارائه شده توسط الگوریتم گرگ خاکستری، نرخ خرابی حسگرها در ناحیه انتخابی برای استقرار گره‌های رله و انرژی باقیمانده گره‌های حاضر در بلوک است. این تابع هدف، برای تعیین میزان برآزندگی راه‌حل sol_u بصورت زیر است [۳۲]:

$$Fit(sol_u) = \frac{T_{error}(sol_u)}{\sum_{i \in B} Eng_i} \quad (۶)$$

T_{error} نرخ وقوع خطا در بلوک انتخابی sol_u برای استقرار گره رله می‌باشد و Eng_i انرژی گره i واقع در بلوک B است. بلوک B می‌تواند هر ناحیه از محیط که تحت پوشش یک گره کنترلر است باشد یا حتی کل محیط مورد پیمایش را به عنوان یک بلوک در نظر گرفت. لذا در این راهکار، با تعیین تابع برآزش، بهترین موقعیت برای گره حسگر، بعنوان گره افزونه رله، جهت پوشش خرابی بدست می‌آید.

۳-۳- راهکار سوم

در راهکار دوم، به منظور پوشش بهتر محیط و کاهش خطا در داده‌های ارسالی، افزونگی در لایه حسگر را دیدیم. این فرایند می‌تواند برای گره‌های کنترلر نیز بکار رود. چرا که در صورت خطا در گره‌های کنترلر، افزونگی در گره‌های حسگر نمی‌تواند موجب حل مشکل در کنترلر شود. لذا برای پوشش بهتر خطاهای احتمالی در گره‌های کنترلر، در محیط افزونگی کنترلرها را در کنار افزونگی گره‌های حسگر می‌توان بکار برد. بدیهی است همان تکنیکهای فرا ابتکاری و مواردی که در راهکار دوم برای

افزودگی گره‌های حسگر گفتیم می‌تواند برای گره‌های کنترلر بصورت جداگانه و یا در ترکیب با گره‌های حسگر بکار رود؛ که در شبیه سازی راهکار ترکیبی آورده شده است.

۴- شبیه‌سازی و نتایج آن

۴-۱- مقدمه

در سیستم مانیتورینگ داده‌های مبتنی بر اینترنت اشیا، برای پیش بینی و اعلام هشدار رویدادهای مخربی مانند زلزله، کارایی سیستم از اهمیت بالایی برخوردار است. لذا هرگونه تلاش جهت بهبود هر چند اندک پارامترهایی از قبیل تاخیر انتشار، انرژی مصرف، صحت داده‌ها و قابلیت اطمینان در این سیستم مفید است. در سیستم مانیتورینگ، به علت گستردگی محیط مورد پایش و تنوع اشیا در سیستم پیام‌رسانی، معمولاً با محدودیت انرژی مصرفی در گره‌های حسگر مواجهیم. همچنین به علت گستردگی محیط و اشیا ارتباطی، هر کدام از گره‌ها و یا ارتباط آنها، ممکن است در معرض خطا یا خرابی قرار گیرند و ترافیک داده‌ها و صحت سیستم را تحت تاثیر قرار دهد. به علاوه، جمع‌آوری صحیح و ارسال با تاخیر کمتر داده‌ها، ضمن جلوگیری از ارسال داده‌های تکراری، مورد توجه است. لذا در ادامه این بخش، پارامترهای کارایی سیستم برای سه راهکار بدون افزودگی، افزودگی در لایه حسگر و افزودگی در لایه کنترلر شبیه سازی شده و مورد ارزیابی قرار می‌گیرد.

۴-۲- پارامترهای شبیه‌سازی

برای شبیه‌سازی طرح پیشنهادی، از محیط نرم افزار متلب استفاده شده است. شبیه‌سازی بر روی گره‌هایی با تعداد ۸۰ تا ۱۶۰ گره در یک محدوده به محیط ۳۰۰۰ متر انجام شده است. فرض شده است که تعداد ۱۰۰ تا ۱۰۰۰ عمل تشخیص رخداد (زمین لرزه) رخ خواهد داد. شبیه‌سازی بر روی یک سیستم با پردازنده اینتل CORE i5 و ۴ گیگابایت و بر روی سیستم عامل ویندوز ۱۰ پیاده سازی شد. پارامترهای شبیه‌سازی موردی در جدول ۱ بیان شده است. البته در مدل‌سازی شبیه‌سازی فرض محدود کننده‌ای، در خصوص گره‌ها، توپولوژی و معماری گره‌های شبکه حسگر لحاظ نشده است. این موضوع، در مقادیر مختلف پارامترهای شبیه‌سازی مثل تعداد گره‌ها، فاصله آن‌ها، انرژی گره‌های حسگر نیز وجود دارد و شبیه‌سازی با مقادیر مختلف آنها نیز قابل انجام است، بطوری‌که برای مثال برای محیط‌های با ابعاد بزرگتر از محدوده ۳۰۰۰ متری مورد آزمایش، این پارامترها نتایج مشابهی تولید کرده‌اند. پروتکل استاندارد مبنایی مورد استفاده برای پیام‌رسانی پروتکل MQTT است که پارامترهای مورد نظر راه‌حل‌های سه‌گانه با هم مقایسه خواهد شد. این پروتکل، یک پروتکل ارتباطی است که بر اساس مدل انتشار-اشتراک عمل می‌کند و بر روی پروتکل TCP/IP اجرا می‌شود.

۴-۳- ارزیابی طرح پیشنهادی

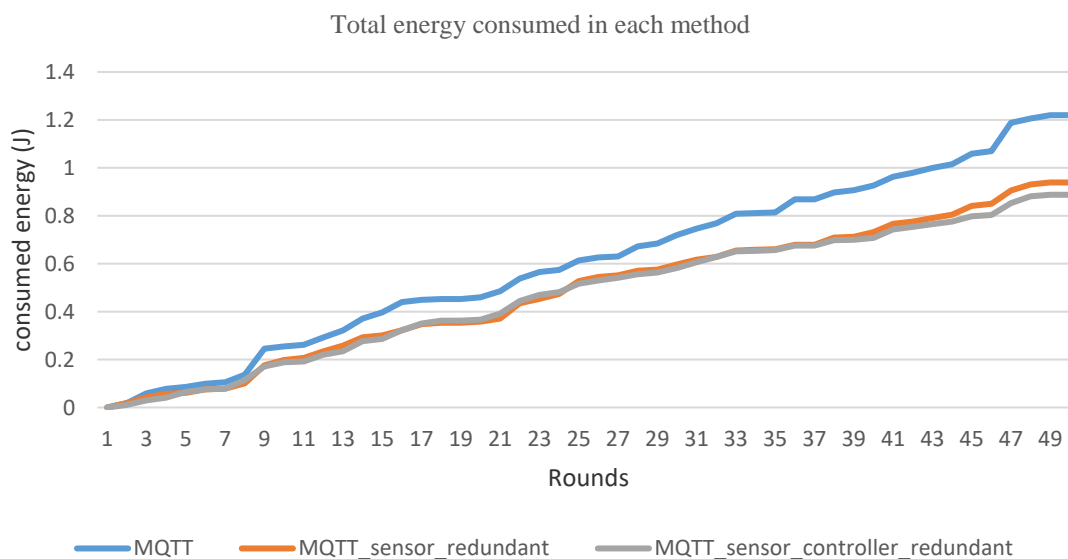
۴-۳-۱- ارزیابی انرژی مصرفی شبکه

برای بررسی وضعیت سیستم پیشنهادی، پایش تا ۵۰ دور انجام شد و عملکرد طرح در راهکارهای متفاوت، مقایسه شده است. در شکل ۶ می‌بینیم که انرژی مصرفی گره‌ها، برای تکرارهای مختلف، در راهکار دوم که شامل افزودگی در اشیا حسگر و راهکار سوم که افزودگی در اشیا حسگر و کنترلر را دارد در کل نسبت به راهکار MQTT مبنایی کمتر است. بنابراین می‌توان دید با اعمال افزودگی‌های لایه اول و دوم می‌توان طول عمر شبکه را افزایش داد. همانگونه که می‌بینیم، در تکرارهای پایین، مجموع انرژی مصرفی در هر سه راهکار تفاوت چندانی ندارد ولی از تکرار ۱۰ به بعد با افزایش تعداد تکرارها انرژی مصرفی در راهکارهای دوم و سوم نسبت به راهکار اول کاهش معناداری پیدا می‌کند، بطوری‌که با افزایش تعداد تکرارها، این تفاوت چشم‌گیرتر خواهد شد. در تکرارهای بالا، مصرف انرژی در راهکار سوم که شامل افزودگی در اشیا حسگر و هم در کنترلر است از راهکار دوم که فقط شامل افزودگی در لایه حسگر است کمتر است، که این موضوع در تکرار چهارم به بعد مشهود است. البته باید مصالحه^۱ بین هزینه افزودگی در کنترلرها و کاهش مصرف انرژی ناشی از آن را حل کرد.

¹Trade off

جدول ۱: پارامترهای شبیه‌سازی
Table 1. Simulation parameters

مقدار	پارامتر
۳۰۰۰ متر	ابعاد محیط استقرار گره‌ها
۸۰-۱۶۰ گره	تعداد گره‌ها
۱۰۰-۱۰۰۰ بسته	تعداد بسته های ارسال شده به مقصد
۲۰۰ متر	شعاع ارسال سیگنال گره‌ها
تصادفی	توزیع گره‌ها در محیط
۰/۰۱ کیلوژول	انرژی اولیه
۵۰	جمعیت اولیه در روش گرگ خاکستری
دور ۵۰	تعداد دور تکرار در روش گرگ خاکستری
۱۰۰	اندازه فیلتر



شکل ۶: مجموع انرژی مصرفی گره‌ها در سه راهکار طرح پیشنهادی

Figure 6. The total energy consumption of the nodes in the three solutions of the proposed procedure

برای مقایسه آماری بهتر و کمی نتایج، خصوصا در مقادیر نزدیک به هم و متفاوت از خطای جذر میانگین مربعات^۱ استفاده می‌شود:

$$RMSD(MQTT_i, 0) = \sqrt{MSE(MQTT_i, 0)} = \sqrt{E((MQTT_i)^2)} = \sqrt{\frac{\sum_{j=0}^n (x_{MQTT_{i,j}})^2}{n}} \quad (7)$$

که در آن RMSD خطای جذر میانگین مربعات پارامتر مورد بررسی، $MQTT_i$ نماینده راهکار اول تا سوم است که با مقادیر صفر به عنوان مبنا مقایسه بکار می‌رود. راهکار اول راهکار بدون افزونگی، راهکار دوم افزونگی در اشیای حسگر و راهکار سوم افزونگی در حسگرها و کنترلرهاست. MSE میانگین مربعات و E امید میانگین است. همچنین $x_{MQTT_{ij}}$ نشان‌دهنده خروجی پارامتر برای راهکار نام است.

لذا طبق جدول شماره ۲ و بررسی میزان خطای میانگین مربعات می‌بینیم که راهکار پایه اول دارای بیشترین مقدار $0/702304001$ است و سپس راهکار دوم با مکان‌یابی کنترلر و $0/558049572$ قرار دارد که و پس از آن، راهکار سوم با عملکرد تقریبا مشابه دوم ولی بهتر و با مقدار $0/542788824$ قرار دارد.

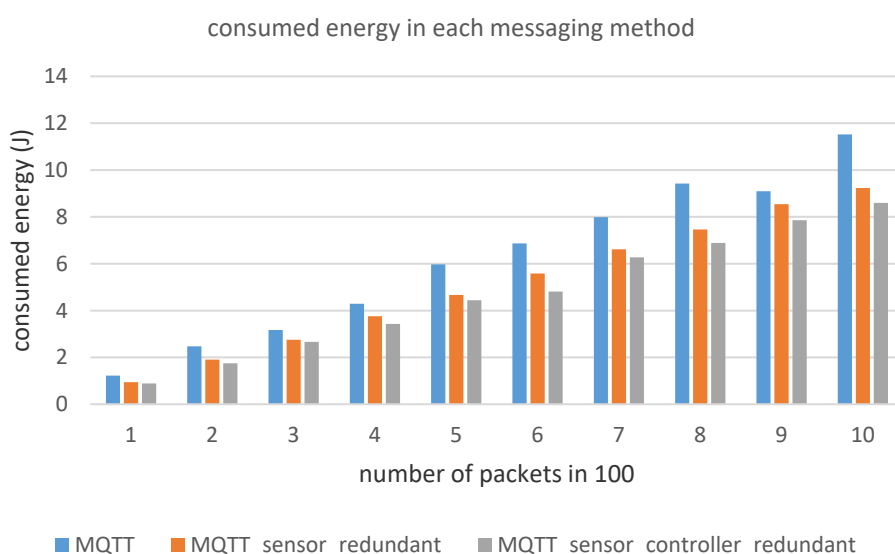
¹Root Mean Square Error

جدول ۲: مقایسه جذر مربع میانگین انرژی مصرفی در راهکارهای سه‌گانه

Table 2. Comparison of square root of average energy consumption in three solutions

راهکار پیشنهادی	میزان RMSD انرژی مصرفی در تکرارهای مختلف
MQTT ₁	۰/۷۰۲۳۰۴۰۰۱
MQTT ₂	۰/۵۵۸۰۴۹۵۷۲
MQTT ₃	۰/۵۴۲۷۸۸۸۲۴

در ادامه، مصرف انرژی را در راه‌حل‌های پیشنهادی با تغییر در تعداد بسته‌های ارسالی مورد ارزیابی قرار دادیم و تاثیر تغییر در تعداد بسته‌ها و ترافیک ناشی از آن را در مشاهده نمودیم. همان‌گونه که در شکل ۷ می‌بینیم انرژی مصرفی در راهکار دوم و سوم علی‌رغم افزایش در تعداد اشیا حسگر و کنترلر، نسبت به راهکار اول برای بسته‌های مختلف کاهش معناداری دارد، بطوری که با افزایش در تعداد بسته‌ها، این کاهش چشمگیرتر خواهد بود. دیگر اینکه راهکار سوم هم نسبت به راهکار دوم مصرف انرژی کمتری را دارد. بنابراین می‌توان گفت، افزونگی باعث کاهش مصرف انرژی در پیام‌رسانی شده است.



شکل ۷: مقایسه مجموع انرژی مصرفی گره‌ها برای تعداد بسته‌های ارسالی مختلف
Figure 7. Comparison of total energy consumption of nodes for different number of sent packets

جدول ۳: مقایسه جذر مربع میانگین انرژی مصرفی برای تعداد مختلف بسته‌ها در راهکارهای سه‌گانه

Table 3. Comparison of square root of average energy consumption for different number of packages in three solutions

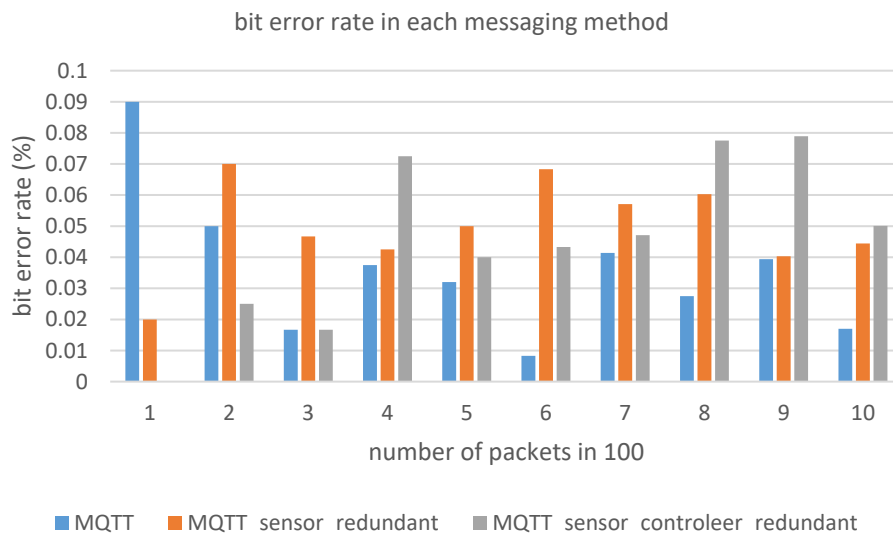
راهکار پیشنهادی	میزان RMSD انرژی مصرفی در راهکارهای سه‌گانه
MQTT ₁	۶/۹۷۷۴۷۳۱۲۸
MQTT ₂	۵/۸۰۳۲۱۳۶۹۵
MQTT ₃	۵/۳۶۶۲۴۲۱۸۷

با مشاهده مقادیر خطای جذر میانگین مربعات برای انرژی مصرفی در سه راهکار، می‌بینیم که به نسبت، راهکار سوم افزونگی حسگر و کنترلر دارای بهترین عملکرد و سپس راهکار دوم افزونگی حسگر قرار دارد و راهکار اول دارای بدترین عملکرد است.

۴-۳-۲- ارزیابی نرخ خطای بی‌تی

با اعمال افزونگی هوشمند در حسگرها و کنترلرها، تحمل‌پذیری در برابر خطا، در شبکه پایش رخدادهای لرزه نگاری، افزایش می‌یابد. زیرا این کار باعث پوشش شبکه در نقاط مختلف خواهد شد. داده‌های در گره‌های افزونه دریافت و داده صحیح، ارسال می‌شود و به جهت پوشش بهتر محیط و داده کمتری به علت عدم ارسال صحیح دچار خطا خواهد شد. برای سنجش این

شاخص، از نرخ خطای بی‌تی استفاده می‌شود. هرچه نرخ خطای بی‌تی مقدار کمتری باشد، نشان می‌دهد که تحمل‌پذیری خطا در شبکه بیشتر است. در شکل ۸ می‌بینیم که در راهکارهای سه‌گانه، با افزایش در تعداد بسته‌های ارسالی مختلف (۱۰۰ تا ۱۰۰۰ بسته) عملکرد راهکارها، متفاوت و مختلف خواهد بود.



شکل ۸: مقایسه نرخ خطای بی‌تی در سه راهکار

Figure 8. Comparison of bit error rate in three solutions

جدول ۴: مقایسه جذر مربع میانگین نرخ خطای بی‌تی برای سه راهکار

Table 4. Comparison of root mean square bit error rate for three solutions

راهکار پیشنهادی	جذر میانگین مربعات نرخ خطای بی‌تی
MQTT ₁	۰/۰۴۲۰۵۹۰۰۶
MQTT ₂	۰/۰۵۱۹۰۷۵۹۱
MQTT ₃	۰/۰۵۱۵۷۰۲۵۳

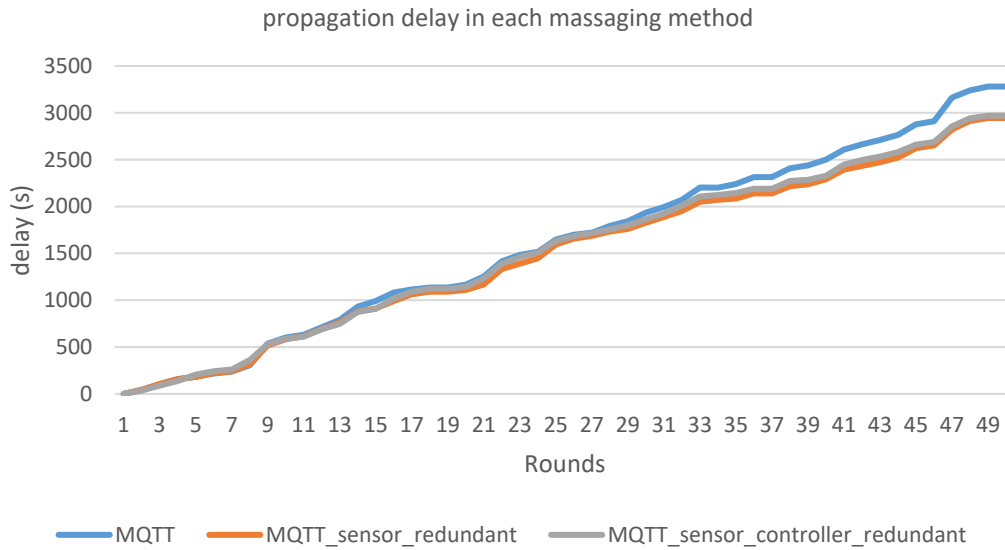
همانطور که از جدول ۴ پیداست، عملکرد راهکار دوم و سوم مشابه است و راهکار اول عملکرد بهتری دارد.

۴-۳-۳- ارزیابی تأخیر انتها به انتها

تأخیر انتها به انتها، میانگین زمان استفاده شده برای پایش یک رویداد توسط گره حسگر، تحویل بسته از گره مبدا به گره‌های بعدی و در نهایت تحویل به ایستگاه اصلی را مشخص می‌کند. شکل ۹ نشان می‌دهد که در تکرارهای پایین، تأخیر انتها به انتها، در هر سه روش تفاوت معناداری ندارد؛ بطوری‌که تا تکرار سی‌ام مقادیر روش‌ها مشابه‌اند، اما رفته رفته با افزایش تکرارها، این مقدار در روش‌های دوم و سوم که افزونگی دارد، نسبت به روش اول کاهش معناداری پیدا می‌کند، بطوری‌که در تکرار پنجاهام این کاهش مشهود است. دلیل آن نیز این می‌تواند باشد که با افزایش تعداد گره‌ها، احتمال وجود گره‌های بدون خطا و کاهش خطای پیام‌رسانی افزایش می‌یابد.

همانطور نیز که از جدول ۵ پیداست میزان RMSD در روش اول بیشتر و در نتیجه تأخیر انتها به انتهای آن در مجموع بیشتر است. پس از آن روش‌های سوم و دوم با مقدار میانگین کمتری قرار دارند.

در ادامه، همین ارزیابی را برای ثبت تأخیر انتها به انتها، در طول اجرای شبیه‌سازی، با تعداد بسته‌های ارسال شده مختلف در شبکه انجام دادیم. بر اساس نتایج بدست آمده در شکل ۱۰ می‌بینیم مانند آزمایش قبل، تأخیر انتها به انتها در انتقال داده در راهکارهای دوم و سوم با بسته‌های مختلف (۱۰۰ تا ۱۰۰۰ بسته) بهتر از روش پایه بدون افزونگی است.

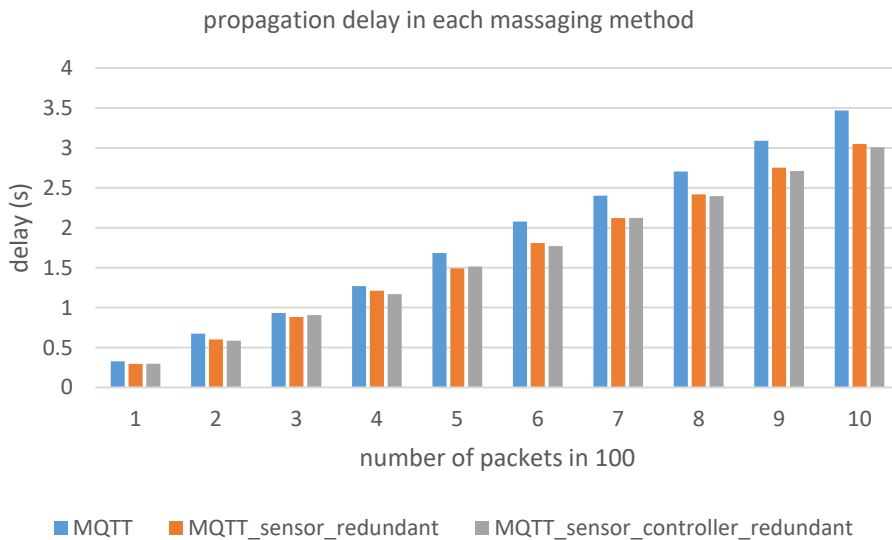


شکل ۹: مقایسه تاخیر انتها به انتها در طول زمان برای سه راهکار
Figure 9. Comparison of end-to-end delay over time for three solutions

جدول ۵: میانگین تاخیر انتها به انتها در راهکارهای سه‌گانه

Table 5. Average end-to-end delay in three solutions

راهکار پیشنهادی	میزان RMSD تاخیر انتها به انتها در راهکارهای سه‌گانه
MQTT ₁	۱۸۸/۴۴۷۵۸۳
MQTT ₂	۱۷۳۶/۵۵۲۰۱۸
MQTT ₃	۱۷۷۰/۹۳۲۶۰۵



شکل ۱۰: مقایسه تاخیر انتها به انتها برای بسته‌های مختلف در سه راهکار
Figure 10. End-to-end delay comparison for different packets in three solutions

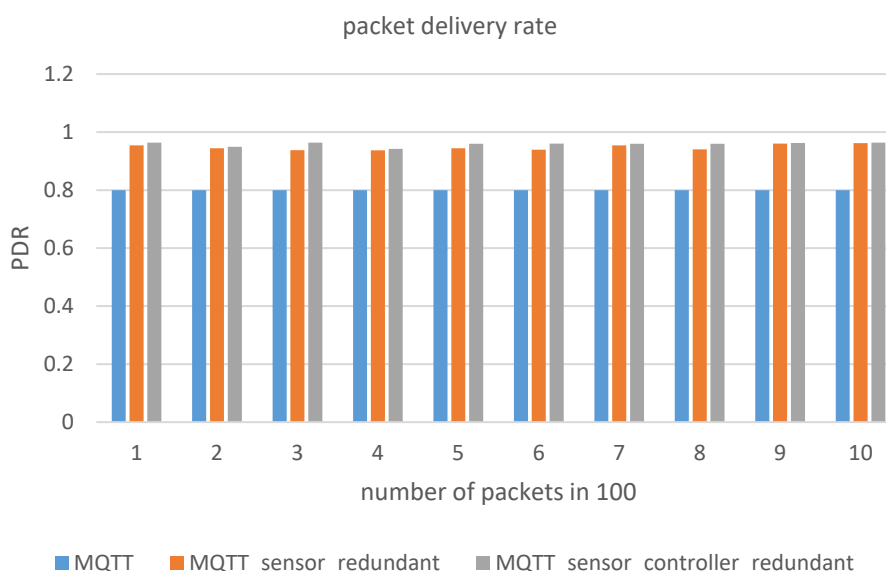
با مشاهده مقادیر جدول ۶ می‌بینیم که در راهکار اصلاحی دوم و سوم میزان RMSD کمتر از راهکار پایه اول را داراست و بهبود معناداری را دارد، بطوریکه راهکار سوم، دارای کمترین میزان RMSD است و سپس راهکار دوم قرار دارد.

جدول ۶: مقایسه جذر میانگین مربعات تاخیر انتها به انتها برای تعداد بسته‌های مختلف در راهکارهای سه‌گانه
Table 6. Comparison of end-to-end root mean square delay for different number of packets in triple solutions

راهکار پیشنهادی	میزان RMSD تاخیر انتها به انتها
MQTT ₁	۲/۱۱۷۹۲۸۳۹
MQTT ₂	۱/۸۸۱۶۰۰۱۲۸
MQTT ₃	۱/۸۶۲۵۸۶۰۰۳

۴-۳-۴- ارزیابی نرخ تحویل موفق بسته‌ها به مقصد

یکی از پارامترهای استاندارد در کارایی و کیفیت سرویس نرخ تحویل موفق بسته به مقصد^۱ است که بصورت درصد تعداد بسته‌های تحویل شده بصورت موفق، به کل بسته‌های ارسالی می‌باشد. از شکل ۱۱ پیداست که نرخ تحویل موفق بسته‌ها، در راهکارهای دوم و سوم بهتر از راهکار اول است. این موضوع به دلیل افزونگی در حسگرها و کنترلرها و افزایش گره‌های سالم در توپولوژی شبکه پیام‌رسانی قابل انتظار است. نکته‌ای که در اینجا قابل توجه است این است که در این شبیه‌سازی برای بسته‌های با تعداد متفاوت صد، دویست، سیصد تا هزار بسته نرخ تحویل بسته، برای راهکار اول مقدار ۷۹/۹۸ درصد است. یعنی تغییر در تعداد بسته‌ها تغییری در نرخ تحویل بسته‌ها در راهکار اول ندارد.



شکل ۱۱: ارزیابی نرخ تحویل موفق بسته‌های ارسالی به مقصد در راهکارهای سه‌گانه
Figure 11. Evaluation of the successful delivery rate of packages sent to the destination in three solutions

جدول ۷: مقایسه RMSD نرخ تحویل بسته‌ها در راهکارهای سه‌گانه
Table 7. Comparison of RMSD of packet delivery rate in three solutions

راهکار پیشنهادی	میزان RMSD نرخ تحویل بسته در پروتکل‌های متفاوت
MQTT ₁	۰/۷۹۹۸۰۶
MQTT ₂	۰/۹۴۷۴۳۱۳۴۸
MQTT ₃	۰/۹۵۸۴۴۴۲۷۸

طبق جدول ۷ راهکار دوم و سوم نرخ تحویل بالای ۹۴ درصد دارند بطوریکه مقدار میانگین نرخ تحویل بسته برای راهکار دوم ۹۴/۷۴ درصد و برای راهکار سوم به میزان ۹۵/۸۴ درصد است و نسبت به راهکار پایه با نرخ تحویل ۷۹/۹۸ درصد بهبود قابل توجهی دارند.

¹Packet Delivery Rate (PDR)

۵- نتیجه گیری

یک سیستم هشدار زلزله می‌تواند کوچکترین لرزشی را قبل از یک زلزله بزرگ تشخیص دهد. دستگاه‌های متصل و فناوری حسگر پیشرفته، نظارت بر محیط زیست سنتی را به یک سیستم نظارت بر محیط هوشمند تبدیل کرده‌اند [۳۳]. با انقلاب تکنولوژیک در جمع‌آوری داده‌ها، شبکه‌های ارتباطی، اینترنت اشیا و تجزیه و تحلیل داده‌های بزرگ، امکان توسعه یک مدل پیش‌بینی زلزله هوشمند برای هشدارهای اولیه در مکان‌های آسیب‌پذیر وجود دارد. فناوری اینترنت اشیا برای به دست آوردن داده‌های حسگر بلادرنگ استفاده می‌شود [۳۴]. از طرفی گستردگی محیط و تنوع و گوناگونی ابزار اینترنت اشیا بعنوان حسگرهای جمع‌آوری داده‌های لرزه‌نگاری لزوم توجه به دقت و صحت داده‌های جمع‌آوری شده و قابلیت اطمینان سیستم را دوچندان می‌کند.

لذا یک چارچوب نظارتی و پیش‌بینی زلزله هوشمند مبتنی بر اینترنت اشیا با استفاده از پروتکل ارتباطی سبک وزن سه لایه MQTT پیشنهاد شده است و با اعمال افزونگی‌های در لایه حسگر و کنترلر در صدد بهبود پارامترهایی از قبیل طول عمر باتری و مصرف انرژی، نرخ خطا و نرخ تحویل موفق بسته‌ها بوده‌ایم.

مصرف انرژی همواره چالش مورد توجهی در سیستم‌های مانیتورینگ بخصوص در ابعاد گسترده محیطی و ناهمگونی تجهیزات بوده است. شبیه‌سازی‌ها نشان داده است که پروتکل استاندارد پایه MQTT دارای مصرف انرژی بالاتری نسبت به دو راهکار اصلاحی پیشنهادی است. همان‌طور که از شکل ۶ پیداست، در تکرارهای بالا تا سی درصد افزونگی در لایه حسگر و لایه کنترلر به نسبت راهکار اول MQTT پایه کاهش مصرف انرژی دارد. از آنسوی بنا به شکل ۷ با افزایش تعداد بسته‌های ارسالی از ۱۰۰ تا ۱۰۰۰ به علت افزایش ترافیک بسته‌ها، مصرف انرژی در سه راهکار افزایش می‌یابد و البته به نسبت راهکار پایه اول دارای بیشترین مصرف انرژی است و پس از آن با اختلاف راهکار دوم افزونگی در لایه حسگر و بعد از آن راهکار سوم افزونگی در لایه کنترلر با اختلاف کمتری از راهکار دوم قرار دارد.

کاهش خطای بی‌بی در سیستم منجر به افزایش قابلیت اطمینان و صحت داده‌ها می‌شود. در هر سه راهکار، ارسال بسته‌های داده با تعداد متفاوت منجر به نرخ خطای بی‌بی مختلفی شده است که این موضوع می‌تواند تحت تاثیر پیکربندی، ترافیک شبکه یا سایر پارامترهای مرتبط باشد. به هر حال می‌توان گفت در مجموع می‌تواند از جدول ۴ هم استنتاج کرد که نتایج حاصل از اعمال افزونگی در هر سه راهکار نتایج مشابهی در نرخ خطای بی‌بی ایجاد کرده است.

کاهش زمان ارسال داده‌ها از مبدا به مقصد منجر به افزایش بلادرنگی سیستم پیام‌رسانی می‌شود که این موضوع در سیستم‌های مانیتورینگ حیاتی است. نتایج حاصل از شبیه‌سازی نشان داده است که میانگین تاخیر انتها به انتها در تکرارهای پایین در راهکار بدون افزونگی و دو راهکار دیگر بدون افزونگی تفاوت معناداری ندارد ولی به مرور و با افزایش تکرارها و بخصوص در تکرارهای بالا، تاخیر انتها به انتها در راهکار دوم و سوم شامل افزونگی در حسگرها و کنترلرها از راهکار اول کاهش معناداری پیدا می‌کند.

و در نهایت پارامتر دیگر مورد انتظار برای افزایش قابلیت اطمینان و صحت عملکرد سیستم، نرخ تحویل موفق بسته‌ها و افزایش این نرخ است. همان‌طور که نتایج حاصل از شبیه‌سازی نیز نشان داده است، در راهکار اول با پروتکل پایه MQTT، نرخ تحویل موفق بسته‌ها برای تعداد مختلف بسته‌ها، مقدار ثابت ۷۸/۹۸ درصد است. به عبارت دیگر تغییر در تعداد بسته‌ها، تاثیری بر نرخ تحویل بسته نداشته است. اما از آنسوی، در راهکار دوم و سوم با اعمال افزونگی، نرخ تحویل بسته‌ها متفاوت و البته همگی به بالای ۹۲ درصد افزایش یافته است که این می‌تواند نتیجه‌ای افزایش تعداد حسگرها و کنترلرها و جایگذاری آنها باشد که احتمال پیام‌رسانی مطمئن را در صورت عدم عملکرد صحیح احتمالی برخی حسگرها و یا کنترلرها افزایش می‌دهد.

برای اعتبارسنجی نتایج حاصل از مشاهدات شبیه‌سازی آزمون تحلیل واریانس را بر روی آن اعمال نمودیم. نتایج حاصل از آزمون بصورت خلاصه در جدول ۸ برای α برابر ۰/۰۵ آمده است. آزمون برای شش پارامتر مجموع انرژی مصرفی، انرژی مصرفی با تعداد بسته‌های مختلف، نرخ خطای بی‌بی، تاخیر انتشار، تاخیر انتشار با تعداد متفاوت بسته و نرخ تحویل بسته انجام شده و مقدار نهایی آماره آزمون فیشر F بدست آمده است. فرضهای آزمون نیز در رابطه ۶ آمده است.

$$\begin{cases} H_0 : \overline{X}_{mqtt} = \overline{X}_{mqtt_sensor_redundant} = \overline{X}_{mqtt_sensor_controller_redundant} \\ H_1 : \overline{X}_{mqtt} \neq \overline{X}_{mqtt_sensor_redundant} \neq \overline{X}_{mqtt_sensor_controller_redundant} \end{cases} \quad (8)$$

فرض صفر بیان می‌دارد که مقدار میانگین نتایج پارامترهای مورد بررسی برای سه راهکار بدون افزونگی، افزونگی در حسگرها و افزونگی در کنترلرها برابر است. فرض یک نیز بیان می‌دارد مقدار میانگین برای یکی از راهکارها (راهکار بدون افزونگی) با دو راهکار دیگر متفاوت است. همانطور که مشاهدات شامل سه دسته داده سه راهکار است لذا درجه آزادی صورت برابر ۲ است. همچنین برای مجموع انرژی مصرفی و تاخیر انتشار نتایج شامل سه دسته پنجاه تایی از مشاهدات است لذا درجه آزادی مخرج برابر ۱۴۷ است و برای چهار پارامتر دیگر نتایج شامل سه دسته ده تایی از داده‌هاست و لذا برای آنها درجه آزادی مخرج برابر ۲۷ است.

جدول ۸: آزمون تحلیل واریانس بر روی داده‌های حاصل از شبیه‌سازی برای $\alpha=0.05$ Table 8. Variance analysis test on the simulation data for $\alpha=0.05$

جدول توزیع فیشر	F محاسبه شده	MS_w	MS_b	درجه آزادی مخرج	درجه آزادی صورت	پارامتر آزمون
۳/۰۵	۴/۰۱۶۴۸۷	۰/۰۹۱۲۳	۰/۳۶۶۴۲۳	۱۴۷	۲	مجموع انرژی مصرفی
۳/۳۵	۵/۷۸۷۵۹۲	۶/۴۰۲۱۴۳	۳۷/۰۵۲۹۹	۲۷	۲	انرژی مصرفی برای تعداد مختلف بسته‌ها
۳/۳۵	۶/۹۴۳۱۶۳	۰/۰۰۰۳۴۲	۰/۰۰۲۳۷۴	۲۷	۲	نرخ خطای بی‌تی
۳/۰۵	۳/۹۸۷۱۱۸	۸۱۰۲۴۷/۷	۳۲۳۰۵۵۳	۱۴۷	۲	تاخیر انتشار
۳/۳۵	۱/۱۷۸۷۲۷	۰/۶۵۰۱۵۲	۰/۰۷۶۶۳۵۱	۲۷	۲	تاخیر انتشار برای تعداد مختلف بسته‌ها
۳/۳۵	۱۴/۹۴۳۱	۰/۰۵۴۷۸	۰/۸۱۸۶۴۴	۲۷	۲	نرخ تحویل بسته‌ها

طبق جدول ۸ مقدار F محاسبه شده برای مجموع انرژی مصرفی برابر ۴/۰۱۶۴۸۷ و بیشتر از مقدار استاندارد ۳/۰۵ جدول فیشر^۱ است و لذا فرض H_1 برقرار می‌شود که به آن معناست که مقدار میانگین برای مجموع انرژی مصرفی در راهکار بدون افزونگی متفاوت از دو راهکار دارای افزونگی است. به بیان دیگر، همانطور که مشاهدات شبیه‌سازی نیز نشان داد، می‌توان استنباط کرد که با دقت بالای ۹۵ درصد (این دقت برای سایر پارامترهای مورد آزمون برقرار است) در راهکار بدون افزونگی نسبت به دو راهکار با افزونگی، بصورت میانگین انرژی بیشتری مصرف می‌شود و اصلاحات انجام شده باعث بهبود عملکرد سیستم از نظر مصرف انرژی می‌شود. در آزمون مصرف انرژی برای بسته‌های با تعداد مختلف ۱۰۰ تا ۱۰۰۰ بسته نیز مقدار F محاسبه شده برای مجموع انرژی مصرفی برابر ۵/۷۸۷۵۹۲ و بیشتر از مقدار استاندارد ۳/۳۵ جدول فیشر است. این نیز به آن معناست که می‌توان استنباط کرد مصرف انرژی برای تعداد متفاوت بسته‌ها نیز در حالت بدون افزونگی بیشتر از دو راهکار دیگر خواهد بود. محاسبات بر روی نرخ خطای بی‌تی نشان می‌دهد که مقدار F با اندازه ۶/۹۴۳۱۶۳ بیشتر از مقدار جدول فیشر بوده است و می‌توان استنباط نمود نرخ خطای بی‌تی در دو راهکار با افزونگی، بهبود قابل توجهی نسبت به راهکار بدون افزونگی داراست. همین طور با محاسبه مقدار ۳/۹۸۷۱۱۸ بزرگ‌تر از مقدار استاندارد فیشر برای تاخیر انتشار، نتیجه می‌گیریم که بهبود و اعمال افزونگی در سیستم منتج به کاهش زمان تاخیر انتشار می‌شود اما F بدست آمده با اندازه ۱/۱۷۸۷۲۷ برای آزمون تاخیر انتشار برای بسته‌های با تعداد متفاوت، کمتر از مقدار استاندارد فیشر است و این بدان معناست که علی‌رغم کاهش تاخیر انتشار در نتایج شبیه‌سازی از طریق آزمون در حالت کلی نمی‌توان استدلال کرد که افزونگی منجر به کاهش تاخیر انتشار می‌شود. در نهایت با مقدار بالای ۱۴/۹۴۳۱ برای نرخ موفق تحویل بسته‌ها، می‌توان استنباط کرد که افزونگی اعمال شده در سیستم منجر به افزایش نرخ تحویل بسته‌ها می‌شود که این تفاوت بخوبی در نتایج شبیه‌سازی در بخش ۴-۳-۴ دیده شد.

¹Fisher

منابع

- [1] R. Dugga, N. Gupta, A. Pandya, P. Mahajan, K. Sharma, T. kaundal and P. Angra, "Building structural analysis based Internet of Things network assisted earthquake detection," *Internet of Things*, vol. 19, p. 100561, August 2022, doi: 10.1016/j.iot.2022.100561.
- [2] K. Saini, S. Kalra and S. K. Sood, "An Integrated Framework for Smart Earthquake Prediction: IoT, Fog and Cloud Computing," *Journal of Grid Computing*, vol. 20, Article number: 17, May 2022, doi:10.1007/s10723-022-09600-7.
- [3] S. K. McBride, D. F. Sumy, A. L. Llenos, G. A. Parker, J. McGuire, J. K. Saunders, M.-A. Meier, P. Schuback, D. Given, R. De-Groot, "Latency and geofence testing of wireless emergency alerts intended for the ShakeAlert earthquake early warning system for the West Coast of the United States of America," *Safety Science*, vol. 157, p. 105898, January 2023, doi: 10.1016/j.ssci.2022.105898.
- [4] R. Wanare, K. K. R. Iyer and P. Jayanthi, "Recent Advances in Early Warning Systems for Landslide Forecasting," *Geohazard Mitigation*, pp. 249–260, doi:10.1007/978-981-16-6140-2_20.
- [5] V. Babu and V. Rajan, "Flood and Earthquake Detection and Rescue Using IoT Technology," 2019 *International Conference on Communication and Electronics Systems (ICCES)*, Coimbatore, India, 2019, pp. 1256-1260, doi: 10.1109/ICCES45898.2019.9002406.
- [6] A. Wu, J. Lee, I. Khan and Y. -W. Kwon, "CrowdQuake+: Data-driven Earthquake Early Warning via IoT and Deep Learning," *IEEE International Conference on Big Data (Big Data)*, Orlando, FL, USA, 2021, pp. 2068-2075, doi: 10.1109/BigData52589.2021.9671971.
- [7] S. Kim, I. Khan, S. Choi and Y. -W. Kwon, "Earthquake Alert Device Using a Low-Cost Accelerometer and its Services," in *IEEE Access*, vol. 9, pp. 121964-121974, 2021, doi: 10.1109/ACCESS.2021.3103505.
- [8] I. Khan, M. Pandey and Y. -W. Kwon, "An earthquake alert system based on a collaborative approach using smart devices," *IEEE/ACM 8th International Conference on Mobile Software Engineering and Systems (MobileSoft)*, Madrid, Spain, 2021, pp. 61-64, doi: 10.1109/MobileSoft52590.2021.00014.
- [9] A. Alphonsa and G. Ravi, "Earthquake early warning system by iot using wireless sensor networks," *International Conference on Wireless Communications, Signal Processing and Networking (WiSPNET)*, 2016, pp. 1201-1205, doi: 10.1109/WiSPNET.2016.7566327.
- [10] R. Pirmagomedov, M. Blinnikov, A. Amelyanovich, R. Glushakov, S. Loskutov, A. Koucheryavy, R. Kirichek and E. Bobrikov, "IoT Based Earthquake Prediction Technology," *International Conference on Next Generation Wired/Wireless Networking Conference on Internet of Things and Smart Spaces, Internet of Things, Smart Spaces, and Next Generation Networks and Systems*, pp 535–546, September 2018, doi: 10.1007/978-3-030-01168-0_48.
- [11] P. Pierleoni, A. Belli, M. Esposito, R. Concetti and L. Palma, "Earthquake Early Warning Services Based on Very Low-Cost Internet of Things Devices," *2022 61st FITCE International Congress Future Telecommunications: Infrastructure and Sustainability (FITCE)*, Article ID: 253424887, November 2022, doi: 10.23919/FITCE56290.2022.9934792.
- [12] S. K. McBride, A. Bostrom, J. Sutton, R. M. De-Groot, A. S. Baltay, B. Terbush, P. Bodin, M. Dixon, E. Holland, R. Arba, P. Laustsen, S. Liu and M. Vinci, "Developing post-alert messaging for ShakeAlert, the earthquake early warning system for the West Coast of the United States of America," *International Journal of Disaster Risk Reduction*, vol. 50, p. 101713, November 2020, doi: 10.1016/j.ijdrr.2020.101713.
- [13] A.-M. Zambrano, I. Pérez, C. E. Palau and Manuel Esteve, "Sensor Web Enablement Applied to an Earthquake Early Warning System," *International Conference on Internet and Distributed Computing Systems*, 2015, pp. 51–62, doi: 10.1007/978-3-319-23237-9_6.
- [14] Y. Chavez-Rivera, B. Espinoza-Garcia and P. R. Yanyachi, "Low Cost Embedded IoT System to Record Meteorological, and Inertial Data in Remote Places," *IEEE URUCON*, Montevideo, Uruguay, 2021, pp. 273-277, doi: 10.1109/URUCON53396.2021.9647077.

- [15] P. Boccadoro, B. Montaruli and L. A. Grieco, "QuakeSense, a LoRa-compliant Earthquake Monitoring Open System," *IEEE/ACM 23rd International Symposium on Distributed Simulation and Real Time Applications (DS-RT)*, Cosenza, Italy, 2019, pp. 1-8, doi: 10.1109/DS-RT47707.2019.8958675.
- [16] N. Moussa, E. Nurellari and A. E. El-Alaoui, "A Novel Energy-Efficient and Reliable ACO-Based Routing Protocol for WSN-Enabled Forest Fires Detection," *Journal of Ambient Intelligence and Humanized Computing*, vol. 14, no. 9, February 2022, doi: 10.1007/s12652-022-03727-x.
- [17] S. Kumari, R. Kumar, S. Kadry, S. Namasudra and D. Taniar, "Maintainable stochastic communication network reliability within tolerable packet error rate," *Computer Communications*, vol. 178, October 2021, pp. 161-168, October 2021, doi: 10.1016/j.comcom.2021.07.023.
- [18] Y. Zhang, W. Zhao, P. Dong, X. Du, W. Qiao and M. Guizani, "Improve the reliability of 6G vehicular communication through skip network coding," *Vehicular Communications*, vol. 33, p. 100400, January 2022, doi: 10.1016/j.vehcom.2021.100400.
- [19] J. Yongguo, L. Qiang, Q. Changshuai, S. Jian and L. Qianqian, "Message-oriented Middleware: A Review," *5th International Conference on Big Data Computing and Communications (BIGCOM)*, QingDao, China, 2019, pp. 88-97, doi: 10.1109/BIGCOM.2019.00023.
- [20] N. Naik, "Choice of effective messaging protocols for IoT systems: MQTT, CoAP, AMQP and HTTP," *IEEE International Systems Engineering Symposium (ISSE)*, Vienna, Austria, 2017, pp. 1-7, doi: 10.1109/SysEng.2017.8088251.
- [21] A. Rizzardi, S. Sicari and A. Coen-Porisin, "Analysis on functionalities and security features of Internet of Things related protocols," *Wireless Networks*, vol. 28, pp. 2857-2887, June 2022, doi: 10.1007/s11276-022-02999-7.
- [22] A. Yamawaki, M. Yamanaka and S. Serikawa, "A sensor node architecture with zero standby power on wireless sensor network," *Artificial Life and Robotics*, vol. 20, pp. 210-216, July 2015, doi: 10.1007/s10015-015-0218-9.
- [23] N. Oukas and M. Boulif, "Sensor Performance Evaluation for Long-Lasting EH-WSNs by GSPN Formulation, Considering Seasonal Sunshine Levels and Dual Standby Strategy," *Arabian Journal for Science and Engineering*, vol. 48, no. 3, June 2022, doi: 10.1007/s13369-022-06970-8.
- [24] B. Guruprakash, C. Balasubramanian and R. Sukumar, "An approach by adopting multi-objective clustering and data collection along with node sleep scheduling for energy efficient and delay aware WSN," *Peer-to-Peer Networking and Applications*, vol. 13, pp. 304-319, 2020, doi: 10.1007/s12083-019-00779-3.
- [25] S. Roshni, J. Senthilkumar, Y. Suresh and V. Mohanraj, "Advertisement valid time triggered firefly and fruit-fly inspired approach for efficient cluster formation and standby CH selection in hierarchical wireless sensor network," *Journal of Ambient Intelligence and Humanized Computing*, vol. 12, pp. 4697-4713, 2021, doi: 10.1007/s12652-020-01873-8.
- [26] W. Barkhoda and H. Sheikhi, "Immigrant imperialist competitive algorithm to solve the multi-constraint node placement problem in target-based wireless sensor networks," *Ad Hoc Networks*, vol. 106, p. 102183, September 2020, doi: 10.1016/j.adhoc.2020.102183.
- [27] S. K. Gupta, P. Kuila and P. K. Jana, "Genetic algorithm approach for k-coverage and m-connected node placement in target based wireless sensor networks," *Computers & Electrical Engineering*, vol. 56, pp. 544-556, November 2016, doi: 10.1016/j.compeleceng.2015.11.009.
- [28] M. Banaie-Dezfouli, M. H. Nadimi-Shahraki and Z. Beheshti, "R-GWO: Representative-based grey wolf optimizer for solving engineering problems," *Applied Soft Computing*, vol. 106, p. 107328, July 2021, doi: 10.1016/j.asoc.2021.107328.
- [29] H. Tang, W. Sun, A. Lin, M. Xue and X. Zhang, "A GWO-based multi-robot cooperation method for target searching in unknown environments," *Expert Systems with Applications*, vol. 186, p. 115795, December 2021, doi: 10.1016/j.eswa.2021.115795.

- [30] S. A. Mirjalili, S. M. Mirjalili and A. Lewis, "Grey Wolf Optimizer," *Advances in Engineering Software*, vol. 69, March 2014, pp. 46-61, doi:10.1016/j.advengsoft.2013.12.007.
- [31] S. Mirjalili, "How effective is the Grey Wolf optimizer in training multi-layer perceptrons," *Applied Intelligence*, vol. 43, pp. 150-161, 2015, doi:10.1007/s10489-014-0645-7.
- [32] S. K. Sankaralingam, N. S. Nagarajan and A. S. Narmadh, "Energy aware decision stump linear programming boosting node classification based data aggregation in WSN," *Computer Communications*, vol. 155, pp. 133-142, April 2020, doi: 10.1016/j.comcom.2020.02.062.
- [33] Y. Pal, S. Nagendram, M. S. Al-Ansari, K. Singh, L.A. Anto-Gracious and P. Pa, "IoT based Weather, Soil, Earthquake, and Air Pollution Monitoring System", *7th International Conference on Computing Methodologies and Communication (ICCMC)*, Erode, India, April 2023, pp. 1212-1217, doi: 10.1109/ICCMC56507.2023.10083932.
- [34] M. Bhatia, T. A. Ahanger and A. Manocha, "Artificial intelligence based real-time earthquake prediction", *Engineering Applications of Artificial Intelligence*, vol. 120, p. 105856, April 2023, doi: 10.1016/j.engappai.2023.105856.

COPYRIGHTS

©2024 by the authors. Published by the Islamic Azad University Bushehr Branch. This article is an open-access article distributed under the terms and conditions of the Creative Commons Attribution 4.0 International (CC BY 4.0) <https://creativecommons.org/licenses/by/4.0>

