Archive of SID

مقاله پژوهشی

تصمیم‌گیری منفعلانه هوشمند برای حسگرهای بیدارشونده در پایش سازه‌ای

سیدسهند نقیب هاشمی، سیدامیر اصغری توچائی و محمدرضا بینش مروستی

چکیده: امروزه از ساختمان‌های اداری و مسکونی گرفته تا ابنیه تاریخی و ساختمان‌های حساس و پراهمیت، نیاز به مراقبت و پایش ویژه دارند. بدیهی است چنین پایشی دارای هزینه، خطا و چالش‌های بسیاری می‌باشد. شبکه‌های حسگر سیمی به دلایلی نظیر هزینه کمتر، کابردهای گسترده‌تر و نصب آسان در موارد زیادی در حال جایگزینی با شبکه‌های حسگر بی‌سیم هستند. در سازه‌های مختلف بسته به وضعیت و نوع سازه، مواردی نظیر مصرف انرژی، دقت و همچنین تحمل اشکال در از بین رفتن گره‌های حسگر حایز اهمیت می‌باشند. بالاخص که با استفاده از شبکه‌های حسگر بی‌سیم، موارد یادشده، چالش‌هایی دایمی هستند که با وجود تحقیقات صورت‌گرفته، ظرفیت بهبودیافتن دارند. ایده اصلی مقاله پیش رو عبارت است از استفاده رویکردی نوآورانه در به کارگیری از فرایند تصمیم‌گیری مارکوف و حسگرهای بیدارشونده، تا به این وسیله هزینه و خطا در پایش سازه‌های پایا و نیمه‌پایا را نسبت به روش‌های فعلی کاهش دهیم و بر اساس صورت مسئله، مزایایی را در پیاده‌سازی و اجرا به همراه داشته باشیم. بنابراین نوآوری روش پیشنهادی، استفاده از فرایند تصمیم‌گیری مارکوف و حسگرهای بیدارشونده به منظور ارائه روشی نوین و بهینه‌تر نسب به روش‌های موجود به صورت اختصاصی برای پایش سلامت سازه‌ای سازه‌های پایا و نیمه‌پایا است. این رویکرد در قالب شش گام تشریح شده است و در مقابل، روش‌های پرکاربردی مورد مقایسه قرار گرفته‌اند بدین گونه که در محیط شبیه‌سازی CupCarbon[1]، با سنجه‌های مختلفی آزمایش و شبیه‌سازی شده‌اند. نتایج نشان می‌دهد راهکار پیشنهادی در مقایسه با راهکارهای مشابه در موارد کاهش مصرفی انرژی از ۱۱ تا ۷۰ درصد، تحمل‌پذیری اشکال در تبادل پیام‌ها از ۱۰ تا ۸۰ درصد و همچنین در مبحث هزینه کل از ۹۳ تا ۹۷ درصد بهبود به دست آورده است.

کلیدواژه: **پایش سلامت سازه‌ای، شبکه‌های حسگر بی‌سیم، فرایند تصمیم‌گیری مارکوف، حسگرهای بیدارشونده.**

۱- مقدمه

پیشرفت‌های اخیر در زمینه الکترونیک و مخابرات بی‌سیم، توانایی طراحی و ساخت حسگرهایی را با توان مصرفی پایین، اندازه کوچک، قیمت مناسب و کاربری‌های گوناگون فراهم آورده است [۱]. این حسگرهای کوچک که توانایی انجام اعمالی چون دریافت اطلاعات مختلف محیطی بر اساس نوع حسگر و پردازش و ارسال آن اطلاعات را دارند، موجب پیدایش حوزه‌ای برای ایجاد و گسترش شبکه‌های موسوم به شبکه حسگر بی‌سیم (WSN)[2] شده‌اند. یک شبکه حسگر بی‌سیم متشکل از تعداد زیادی گره‌های حسگر است که در یک محیط به طور گسترده پخش شده و به جمع‌آوری اطلاعات از محیط می‌پردازند. لزوماً مکان قرارگرفتن گره‌های حسگر، از قبل تعیین شده و مشخص نیست. چنین خصوصیتی این امکان را فراهم آورده که بتوان آنها را در مکان‌های خطرناک یا غیر قابل دسترس رها نمود [۲] و چنین کاربردی، شبکه‌های حسگر بی‌سیم را به ابزاری مناسب جهت حل مسایل و کاربردهایی گسترده و جدید در محیط پیرامون تبدیل می‌کند [۳].

یکی از حوزه‌هایی که در آن چالش‌های بسیار است و راه حل بسیاری از مسایل آن را می‌توان با شبکه‌های حسگر بی‌سیم ارائه داد، حوزه پایش سلامت سازه‌ای (SHM)[3] است [۴]. هنگامی که از شبکه‌های حسگر بی‌سیم برای پایش سلامت سازه‌ای استفاده کنیم، یکی از حوزه‌های مهمی که در آن می‌توان کارایی کلی شبکه‌های حسگر بی‌سیم را بهبود بخشید، حوزه کاهش مصرف انرژی می‌باشد [۲]. یکی از عمده راهکارهای کاهش مصرف انرژی در شبکه‌های حسگر بی‌سیم نیز مکان‌یابی بهینه حسگرها در شبکه است. از طرفی غالباً شبکه‌ها در حالت بهینه توزیع برای کاهش مصرف انرژی بسیار شکننده می‌باشند و با حذف گرهی به هر دلیل، شبکه دچار اختلالات عمده می‌گردد [۵]. برای مثال در نظر داشته باشید که گره‌های حسگر به باتری محدودی مجهز هستند، در حالی که گره‌های مرکزی[4] معمولاً از نظر محدودیت انرژی آزاد می‌باشند. در چنین شبکه‌ای انرژی یک منبع ارزشمند محسوب می‌شود که عمدتاً در انتقال اطلاعات استفاده می‌گردد [۶] و [۷]. معمولاً گره‌های حسگری که در اطراف یک گره مرکزی قرار می‌گیرند با سرعت بیشتری تخلیه انرژی می‌شوند، زیرا شیوه کار بدین صورت است که هر گره، حوادث را به صورت دوره‌ای به همسایگان بعدی منتقل می‌کند و یا به طور مستقیم به گره مرکزی منتقل می‌کند و در نتیجه مبادلات انرژی در منطقه نزدیک به گره مرکزی حجیم می‌باشد. علاوه بر این، انرژی گره‌های حسگر در برخی از نقاط دیگر شبکه نیز به دلایل مختلفی ممکن است بسیار سریع تخلیه شود [۸]. این انتخاب تکراری گره‌های حسگر که نزدیک به گره مرکزی هستند، باعث مرگ گره‌های حسگر می‌شود. مرگ زودرس

این مقاله در تاریخ ۱۰ مرداد ماه ۱۳۹۹ دریافت و در تاریخ ۲۸ تیر ماه ۱۴۰۰ بازنگری شد.

سیدسهند نقیب هاشمی، گروه مهندسی برق و کامپیوتر، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه خوارزمی، تهران، ایران، (email: sahand.twastica@gmail.com).

سیدامیر اصغری توچائی (نویسنده مسئول)، گروه مهندسی برق و کامپیوتر، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه خوارزمی، تهران، ایران، (email: asghari@khu.ac.ir).

محمدرضا بینش مروستی، گروه مهندسی برق و کامپیوتر، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه خوارزمی، تهران، ایران، (email: marvasti@khu.ac.ir).

1. http://cupcarbon.com/

2. Wireless Sensor Network

3. Structural Health Monitoring

4. Sink Node

www.SID.ir

Archive of SID

گره‌های حسگر که به کل شبکه متصل هستند نیز منجر به مشکل جدی حفره‌های انرژی خواهد شد [۵] و [۹] تا [۱۱]. در واقع مصرف انرژی بالا و به تبع آن طول عمر کوتاه شبکه از مهم‌ترین چالش‌های شبکه‌های حسگر بی‌سیم هستند [۱۲]. برای ایجاد تعادل میان این دو هدف (مصرف انرژی بهینه و افزایش طول عمر شبکه) بایستی تحمل‌پذیری اشکال را در شبکه مورد نظر افزایش داد. در این مقاله، قصد بر این است که با استفاده از تکنولوژی‌های حسگرهای بیدارشونده، مصرف انرژی و طول عمر شبکه نسبت به روش‌های فعلی بهبود داده شود. برای این منظور، از فرایند تصمیم‌گیری مارکوف برای تصمیم‌گیری و هدایت رفتار بهینه حسگرها استفاده خواهد شد تا تحمل‌پذیری تغییرات تا حد قابل قبولی افزایش داده شود.

در ادامه و در بخش ۲ تعاریف مهم آمده که در آن تعاریف پرکاربردی که در این مقاله به کرات استفاده شده‌اند شرح داده شده و پس از آن در بخش ۳ به کارهای پیشین صورت‌گرفته پرداخته شده است. در خصوص چندین پژوهش، توضیحاتی ارائه گردیده و همچنین مزایا و معایب آنها آمده و سپس در بخش ۴، الگوریتم پیشنهادی در ۹ زیربخش مفصلاً شرح داده شده است. در انتها نیز پس از بررسی، نتایج حاصل از آزمایش‌ها در بخش ۵ و نتیجه‌گیری مقاله در بخش ۶ آورده شده است.

۲- تعاریف

در این بخش تعاریف مهمی که در بخش‌هایی نظیر کارهای پیشین و همچنین در راهکار پیشنهادی از اهمیت بالایی برخوردار هستند، آورده شده است.

۲-۱ فرایند تصمیم‌گیری مارکوف

شبکه‌های حسگر بی‌سیم مورد استفاده در این مقاله، شامل گره‌های بیدارشونده و منابع محدود انرژی هستند. این دستگاه‌ها برای نظارت بر یک یا چند پدیده فیزیکی در یک ناحیه مورد نظر همکاری می‌کنند. شبکه‌های حسگر بی‌سیم در محیط‌های نظارت‌شده به عنوان سیستم‌های تصادفی عمل می‌کنند. برای خدمات طولانی‌مدت و هزینه نگهداری کم، شبکه‌های حسگر بی‌سیم نیازمند روش‌های سازگار و قدرتمند برای تبادل اطلاعات، فرمول‌بندی هم‌بندی، بهینه‌سازی منابع و قدرت، حس پوشش و تشخیص شیء و چالش‌های امنیتی هستند. در مواجهه با این مشکلات مذکور، گره‌های حسگر برای تصمیم‌گیری بهینه از مجموعه‌ای از استراتژی‌های در دسترس برای رسیدن به اهداف در نظر گرفته شده استفاده می‌کنند. در این مقاله، چارچوب تصمیم‌گیری مارکوف (MDP)[1] از یک ابزار تصمیم‌گیری قدرتمند برای توسعه الگوریتم‌های تطبیقی و پروتکل‌های شبکه‌های حسگر بی‌سیم استفاده می‌کند. بدین گونه که روش‌های مختلف چنین رویکردی مورد بحث و مقایسه قرار گرفته است تا بتوان به بهترین شکل از این چارچوب برای تصمیم‌گیری استفاده کرد [۱۳].

فرایند تصمیم‌گیری مارکوف یک مدل بهینه‌سازی برای تصمیم‌گیری در شرایط عدم قطعیت است و یک فرایند تصمیم‌گیری تصادفی از یک عامل در تعامل با یک محیط یا سیستم را توصیف می‌کند. در هر زمان تصمیم‌گیری، سیستم در یک حالت خاص باقی می‌ماند و عامل، تصمیم گرفته که در این حالت وجود داشته باشد. پس از انجام یک عمل، عامل یک پاداش فوری را دریافت می‌کند و سیستم با توجه به یک احتمال انتقالی به وضعیتی جدید منتقل می‌شود. برای شبکه‌های حسگر بی‌سیم، فرایند تصمیم‌گیری مارکوف برای مدل‌سازی تعامل بین گره حسگر بی‌سیم (به عنوان مثال یک عامل) و محیط اطراف آن (یعنی یک سیستم) برای دستیابی به برخی اهداف استفاده می‌شود [۱۳]. به عنوان مثال، فرایند تصمیم‌گیری مارکوف می‌تواند کنترل انرژی یا تصمیم مسیریابی در شبکه‌های حسگر بی‌سیم را بهینه‌سازی کند [۱۴].

فرایند تصمیم‌گیری با استفاده از مقادیر (S, A, P, R, T) به شرح زیر تعریف می‌شود:

S: مجموعه‌ای متناهی از وضعیت‌ها

A: مجموعه‌ای متناهی از اعمال

P: تابع تغییر احتمالات وضعیت‌ها از وضعیت s به s' پس از آن که عمل a صورت گرفت.

R: پاداش آنی که پس از انجام عمل a اتخاذ می‌گردد.

T: چرخه تصمیم که می‌تواند متناهی یا غیر متناهی باشد.

π: سیاستی که وظیفه نگاشت یک وضعیت به یک عمل را بر عهده دارد.

γ: ضریب کاهش که نشان‌دهنده تفاوت ارزش پاداش آتی با پاداش فعلی است.

یک سیاست بهینه که در آن به دنبال حداکثرکردن پاداش به دست آمده $(\max V_\pi)$ هستیم به شرح زیر می‌باشد [۱۳]

$$\max V_\pi(s) = E_{\pi,s}[\sum_{t=1}^{T} \gamma^t R(s'_t | s_t, \pi(a_t))] \qquad (۱)$$

که در آن s_t و a_t به ترتیب عبارتند از وضعیت حال حاضر و همچنین اقدام اتخاذشده در زمان t.

۲-۲ پایش سلامت سازه‌ای

پایش سلامت سازه‌ای یکی از کاربردهای شبکه‌های حسگر است که در آن حسگرهای توزیع‌شده در سراسر یک سازه برای ارزیابی سلامت سازه مورد استفاده قرار می‌گیرند [۱۵] و [۱۶]. سیستم‌های پایش سلامت سازه‌ای در گذشته جهت استفاده از شبکه‌های حسگر سیمی طراحی می‌شدند، هرچند قابلیت اطمینان بالا و هزینه‌های پایین نصب و تعمیر و نگهداری WSNها آنها را به یک پلتفرم جایگزین غالب بدل کرده است [۱۷] و [۱۸]. شبکه‌های حسگر سیمی با توجه به هزینه‌های بالای نصبی که دارند، عموماً تنها برای کاربردهای بلندمدت پایش سلامت سازه‌ای که در آنها سلامت سازه از اهمیت حیاتی برخوردار است امکان‌پذیر هستند. کاهش قابل توجه هزینه استفاده از شبکه‌های حسگر بی‌سیم برای پایش سلامت سازه‌ای موجب می‌شود که استفاده از آنها در زیرساخت‌های مهم عمومی و خصوصی ممکن شده و استفاده از آنها در کاربردهایی مانند نظارت کوتاه‌مدت سازه‌ای افزایش یابد. چنین سیستم‌هایی می‌توانند طول عمر سازه‌های متعددی را با ایجاد تشخیص زودهنگام آسیب و حذف هزینه بازرسی‌های معمول افزایش دهند.

۳- کارهای پیشین

تا کنون تحقیقات پژوهشی زیادی حول محور پایش سازه‌ای و همچنین شبکه‌های حسگر بی‌سیم صورت گرفته است. این دو حوزه بسیار گسترده بوده و بسیاری از پژوهش‌های صورت‌گرفته نیز متنوع و در ادبیات دانشگاهی، بین حوزه‌ای می‌باشند. بخش‌های گزینش‌شده از کارهای پیشین که در ادامه آورده شده است، با الگوریتم پیشنهادی این مقاله

1. Markov Decision Process

www.SID.ir

Archive of SID

مرتبط بوده و این الگوریتم به نوعی بر پایه این تحقیقات بنا شده و شکل گرفته است. در هر یک از بخش‌های مذکور تلاش گردیده که مختصری از کارهای پیشین انجام‌شده آورده شود. در عین حال تمرکز مطالب بر نوع استفاده‌ای می‌باشد که الگوریتم پیشنهادی از این مباحث و پژوهش‌های صورت‌گرفته برده است.

۳-۱ حوزه سیستم‌های بیدارشونده

به طور کلی، سیستم‌های بیدارشونده رادیویی می‌توانند به دو گروه تقسیم شوند: مدارهای کاملاً منفعل و مدارهای نیمه‌فعال یا کاملاً فعال. گروه اول می‌توانند بدون هیچ گونه منبع تغذیه کار کنند، زیرا مدار می‌تواند انرژی را از قدرت ارتباطی استخراج و از آن برای ایجاد وقفه استفاده کند [۱۹]. گیرنده‌های کاملاً منفعل قادر به تشخیص فعالیت در کانال ارتباطی هستند و قادر به تشخیص یک سیگنال بیداری از عاملان دیگر نیستند. علاوه بر این، غیر ممکن است دستورات یا داده‌ها را برای انتخاب گره مناسب دریافت کنند. این نوع مدارها در مقایسه با بسیاری از کاربردهای شبکه‌های حسگر بی‌سیم معمولی محدودیت دارند. با حساسیت حدود dBm ۳۰، این مدارها نیاز به قدرت انتقال بالاتری دارند یا در صورت امکان، آنتن بزرگ‌تری را می‌توان برای گسترش دامنه به ده‌ها متر استفاده کرد [۲]. با توجه به این محدودیت‌ها، معمولاً برای کاربردهای محدود مناسب هستند، در عین حالی که مکانیزم آدرس‌دادن مورد نیاز نیست. به عنوان مثال، آنها می‌توانند در برخی از تراشه‌های قابل برنامه‌ریزی، شبکه‌های پزشکی در بدن، پروتکل‌های ارتباطی نزدیک و RFID استفاده شوند [۲۰]. با وجود این که ویژگی‌های آنها برای اکثر سناریوهای شبکه‌های حسگر بی‌سیم جذاب نیستند، چندین روش بر اساس رویکرد کاملاً منفعل و مصرف انرژی صفر برای WUR[1]ها در شبکه‌های حسگر بی‌سیم ارائه شده‌اند که برخی از آنها عبارتند از [۱۹]، [۲۱] و [۲۲].

گرچه ویژگی مصرف انرژی صفر بسیار جذاب است، تمرکز اصلی این کارها دستیابی به طیف وسیع (حساسیت کمتر از dBm ۳۰) می‌باشد. با افزایش دامنه ارتباطات، کاربردهای شبکه‌های حسگر بی‌سیم بیشتر می‌توانند از رادیوهای بیدار و صرفه‌جویی در مصرف برق خود بهره‌مند شوند و به همین دلیل در این مقاله نیز از گیرنده نیمه‌فعال استفاده خواهد شد.

در گروه دوم، رادیوهای بیدارشونده به عنوان گیرنده‌های بیدارشونده نیمه یا کاملاً فعال شناخته می‌شوند. در پژوهش‌های صورت‌گرفته، رایج‌ترین روش‌ها نیمه‌فعال هستند، جایی که قدرت تنها به حداقل بخش اجزای گیرنده عرضه می‌شود. راهکارهای ارائه‌شده در [۲۳] تا [۲۶] معماری مشابهی را برای WURهای بسیار کم‌قدرت شبکه‌های حسگر بی‌سیم نشان می‌دهد. همه آنها با کاهش فعالیت‌های حسی گره‌های حسگر، کل مصرف انرژی شبکه را به شدت کاهش می‌دهند. تمام این راه حل‌ها از دیودهای شاتکی[2] برای شناسه‌های بسته و مقایسه استفاده می‌کنند.

گیرنده‌های بیدارشونده کاملاً فعال نیز وجود دارند که از اجزای فعال برای یک یک‌سوساز و ژنراتور وقفه استفاده می‌کنند. در یکی از مقالات یک راه حل با یک یک‌سوکننده، تقویت‌کننده و تشخیص سیگنال از خواب بیدارکننده ارائه شده که حساسیت بالایی دارند [۲۷].

1. Wake Up Radio
2. Schottky Diodes

۳-۲ فهم همکارانه

پردازش داده‌ها و شناسایی رویداد، یکی از نقش‌های اصلی را در شبکه‌های حسگر بی‌سیم ایفا می‌کنند. روش‌های مختلفی برای پردازش داده‌ها، انتقال داده‌ها و به تبع آنها تشخیص رویدادها در یک شبکه حسگر بی‌سیم وجود دارد که در آن حسگرها در کنار هم، فهمی همکارانه دارند [۲۸].

۳-۲-۱ تشخیص محلی

رویکرد تشخیص محلی، رویکردی بسیار ساده است اما سربار ارتباطی قابل ملاحظه‌ای ایجاد می‌کند و فقط برای انواع مختلفی از رویدادها قابل استفاده می‌باشد. به عنوان مثال می‌توان به سیستم نظارت بر نرده‌ها که توسط پژوهشگران در [۲۹] ارائه شده است اشاره نمود.

۳-۲-۲ تشخیص متمرکز

تشخیص رویداد متمرکز به طور گسترده‌ای در دنیای واقعی استفاده می‌شود. تمام گره‌ها یک داده حسی خام یا پیش‌پردازش را مستقیماً به ایستگاه پایه ارسال می‌کنند که منابع محاسباتی و انرژی قابل توجهی دارد. برای مثال تشخیص رویداد با استفاده از یک راهکار متمرکز برای ردیابی وسایل نقلیه نیز توسط گروهی از پژوهشگران در [۳۰] ارائه گردیده است.

۳-۲-۳ ارزیابی غیر متمرکز

ارزیابی غیر متمرکز یک راه برای مقابله با مشکلات ذکرشده رویکرد متمرکز است. در این رویکرد، شبکه به زیرشبکه‌های کوچکی که به طور خودکار کار می‌کنند، خوشه‌بندی می‌شود. محدودیت‌های این رویکرد در سناریوهای Ad Hoc ظاهر می‌شود، زمانی که شبکه با انتخاب اولویت رویداد- آگنوستیک از سرخوشه‌ها دچار اختلال می‌گردد [۳۱].

۳-۲-٤ ارزیابی توزیع‌شده

در ارزیابی توزیع‌شده، داده‌ها به صورت خودکار پردازش می‌شوند و می‌توانند نقش‌های مختلفی را در طول فرایند تشخیص رویداد بگیرند. اگر چندین گره یک رویداد را تشخیص دهند، آنها با یکدیگر ارتباط برقرار نموده و تصمیم می‌گیرند که به طور خودمختار (یعنی بدون پشتیبانی از یک ایستگاه پایه یا سرخوشه‌ای) چه نوع رخدادی، اتفاق افتاده است. رویکرد ارزیابی توزیع‌شده برای WSNهایی که بر روی همبندی ناشناخته‌ای کار می‌کنند، نیاز به صرفه‌جویی گسترده انرژی دارند اما از نظر کارایی بسیار قدرتمند هستند. در این خصوص می‌توان به [۳۲] مراجعه نمود.

در راهکار ارائه‌شده در این مقاله یا به عبارتی تصمیم‌گیری منفعلانه هوشمند، تشخیص به صورت توزیع‌شده صورت می‌گیرد ولی عملکرد تا حدودی به صورت منفعلانه می‌باشد.

۳-۳ حسگرهای چندهسته‌ای نهفته

با بهبودیافتن میزان مصرف انرژی و همچنین بهبود وضعیت باتری‌ها در حسگرهای بی‌سیم و از آنجایی که شبکه‌های حسگر بی‌سیم تک‌هسته‌ای به زودی قادر به برآورده‌کردن نیازهای رو به افزایش کاربردهایی که غنی از اطلاعات هستند (مانند شبکه های حسگر تصویر) نیستند، حرکت به سمت حسگرهای چندهسته‌ای ضروری به نظر می‌رسد [۳۳] که پژوهش‌هایی نیز در این رابطه در [۳۴] تا [۳۶] صورت گرفته است. راهکار ارائه‌شده در این مقاله نیز به گونه‌ای طراحی و پیاده‌سازی شده که قابل تعمیم و هماهنگ با حسگرهای چندهسته‌ای نهفته باشد.

www.SID.ir

Archive of SID

۳-٤ سیستم عامل

در حوزه شبکه‌های حسگر بی‌سیم، سیستم عامل‌های مختلف معمولاً از دو رویکرد یکپارچه و یا پیمانه‌ای بهره می‌برند. رویکرد یکپارچه، انتخاب خوبی برای ایجاد سیستم با هزینه اندک است [۳۴]. همچنین، این رویکرد نیاز به انرژی کمتری دارد که می‌تواند در هنگام برنامه‌نویسی مجدد، همان کد اصلی را توسعه دهد. رویکرد پیمانه‌ای باعث افزایش قابلیت پذیرش سیستم در برنامه‌های اضافی اجرایی می‌شود، اما نیاز به انرژی بیشتری برای انتشار کد سفارشی‌در هنگام برنامه‌نویسی مجدد وجود دارد. اکثر رویکردها برای افزایش قابلیت اطمینان (مانند جلوگیری از خطرات کنترلی و داده‌ای [۳۷]) و قابلیت پذیرش (به عنوان مثال، پیمانه‌های قابل بارگذاری [۳۸] و ماشین‌های مجازی [۳۹]) پیچیدگی سیستم، انرژی، قابلیت اطمینان و طراحی سیستم عامل کوچک را کاهش می‌دهند. NesC [۴۰]، یک نماینده از زبان‌های با کاربرد خاص در بهینه‌سازی حجم برنامه کاربردی است، اما منحنی یادگیری بزرگی برای برنامه‌نویسان کاربردی دارد. LiteC++ [۴۱] دارای سربار اضافی اجرایی است اما برای برنامه‌نویسان کاربردی سنتی آشنا بوده و بنابراین در محیط عملیاتی، استفاده از آن منطقی است. همچنین لازم به ذکر است که برخی از رویکردها تنها می‌توانند برای دستیابی به یک هدف خاص ترکیب شوند. به عنوان مثال، رویکرد پیمانه‌ای معمولاً در یک سیستم پویا اجرا می‌شود که در آن منابع بیشتری می‌توانند در زمان اجرا اختصاص داده شوند.

۳-۵ شبیه‌سازی شبکه‌های حسگر بی‌سیم

چندین راه حل مجازی‌سازی در سطح گره موجود است. در گره‌های حسگر نسل اول، مدل برنامه‌ریزی انتخاب، رویدادمحور و اجرای آن ساده بود، اما هنگامی که محدودیت‌های آن آشکار گردید، رویکرد مبتنی بر موضوع برای پیاده‌سازی کارهای پیچیده‌تر و هم‌زمان در گره‌های حسگر مورد استفاده قرار گرفت. در میان پلتفرم‌های موجود، TinyOS و Contiki بسیار محبوب و دارای پشتیبانی شبکه‌ای از کاربران و برنامه‌نویسان هستند. Contiki در حال حاضر در میان متخصصان نرم‌افزار به عنوان یک پلتفرم برای IoT در نظر گرفته می‌شود [۴۲] و در دهه گذشته، بسیاری از ویژگی‌های نوآورانه را به خود افزوده است. RIOT نیز رویکردی جدید برای طراحی سیستم عامل با قابلیت اجرای برنامه‌های C++/C در سیستم‌های حسگر ناهمگن است [۴۳].

۳-٦ مکان‌یابی پویا به منظور تحمل‌پذیری تغییرات

با استفاده از سیستم عامل Contiki و شبیه‌سازی‌های صورت‌گرفته بالاخص بررسی شبیه‌سازی‌های پژوهش‌هایی نظیر [۴۴] و [۴۵]، دو موضوع اساسی حایز اهمیت است: یکی تفاوت اندک روش‌های مذکور در موضوعاتی نظیر کاهش مصرف انرژی و صحت تحلیل‌های صورت‌گرفته از اطلاعات که از جمله مهم‌ترین موضوعات در شبکه‌های حسگر بی‌سیم هستند و دیگری استفاده از محیط‌های آزمایشی انتزاعی متفاوت و گوناگون که در واقع عمل مقایسه و نتیجه‌گیری درست را بسیار مشکل می‌کند. همه اینها باعث شده که پژوهش‌های مذکور فاقد پویایی لازم جهت پاسخ‌گویی در محیط طبیعی که شرایط آن به صورت پیوسته در حال تغییر است باشند. بنابراین اولین گام در تبیین الگوریتم پیشنهادی حرکت به سمت مکان‌یابی پویا می‌باشد تا بدین وسیله، تحمل‌پذیری تغییرات محیطی در راهکار افزایش یابد.

۳-۷ جایگذاری حسگرها

اولین شبیه‌سازی‌های صورت‌گرفته در مقاله با استفاده از سیستم عامل TinyOs[1] صورت گرفتند. در مراحل بعدی با توجه به نیاز ایجادشده در خصوص پیاده‌سازی حسگرهای چندهسته‌ای، این امکان در محیط‌های شبیه‌سازی Contiki[2] و CupCarbon دیده شد [۳۴] و در نتیجه پیاده‌سازی‌ها، مقایساتی با استفاده از آن صورت گرفت که مستندات برخی از آنها در تارنمای مربوط به مقاله[3] موجود می‌باشد.

بدیهی است که برای افزایش طول عمر شبکه، جایگذاری حسگرها از اهمیت بالایی برخوردار است. در ساده‌ترین صورت اگر جایگذاری به درستی انجام نشود و دو زیرشبکه عظیم تنها با یک حسگر گلوگاه به یکدیگر مرتبط شوند، به سادگی در اثر خرابی حسگر مذکور و یا اتمام انرژی آن، کل شبکه مختل خواهد شد. از این رو در شبیه‌سازی‌هایی که در جریان این پژوهش با استفاده از پلتفرم Contiki و CupCarbon انجام شد، بارها به صورت خاص‌منظوره به موضوع جایگذاری حسگرها توجه شده است. مسئله حایز اهمیت آن است که استفاده از روش‌ها و پژوهش‌هایی مانند [۴۶] تا [۴۸] موجب می‌شود که تا حدود زیادی از خطاهای پرهزینه جایگذاری اشتباه دوری گردد ولی در سطح کلان هر کدام از جایگذاری‌ها اختلاف چندانی با هم نداشته و برتری یا ضعف آنها در قبال یکدیگر در محیط‌های موردی می‌باشند. آزمایش‌های انجام‌شده با استفاده از روش‌های جایگذاری متفاوت با استفاده پلتفرم Contiki انجام گردیده که نتایج آن در شکل ۱ آمده است. در این آزمایش سه راهکار با عناوین Near-Field [۴۶]، Semidefinite [۴۷] و Minimal Relay [۴۸] با یکدیگر مقایسه شده‌اند. لازم به ذکر است که آزمایش زیر به منظور جایگذاری در یک محیط سازه‌ای ساده که به شکل ذوزنقه و به مساحت ۱۰۰ متر مربع می‌باشد، انجام شده که به دلیل یکپارچه‌نبودن شکل محیط و عدم هماهنگی با نحوه اجزا در مقالات مذکور، در هنگام پیاده‌سازی مسئله به چندین مسئله کوچک‌تر شکسته شده است.

٤- الگوریتم پیشنهادی

در ابتدا، تمرکز پژوهش انجام‌شده بر روی بهبود وضعیت مصرف انرژی و همچنین افزایش طول عمر شبکه با استفاده از بهینه‌سازی دو موضوع مکان‌یابی و استفاده از حسگرهای بیدارشونده متمرکز بود، که در این راستا فعالیت‌هایی نظیر مکان‌یابی پویا به منظور تحمل‌پذیری تغییرات محیطی در شبکه‌های حسگر بی‌سیم و همچنین رویکردی به منظور استفاده از حسگرهای بی‌سیم کاملاً منفعل صورت گرفته شد. در ادامه چنین مسیری، چالش‌هایی وجود داشت که مهم‌ترین آنها حجم بالای پردازش و قدرت مورد نیاز پردازشی در پیاده‌سازی راهکارهای مکان‌یابی پویا بود و تأمین انرژی مورد نیاز این حجم بالای پردازش عملاً در شبکه‌های حسگر بی‌سیم ممکن نمی‌باشد.

بنابراین راهکار پیشنهادی مختص حوزه پایش سازه‌ای ارائه شده که بدین صورت استفاده از راهکار پیشنهادی چالش‌های مذکور را نداشته و راهکاری عملی و ممکن می‌باشد.

٤-۱ اهمیت جایگذاری در پایش سازه‌ای

پایش‌های سازه‌ای در حوزه شبکه‌های حسگر بی‌سیم دارای شرایط و

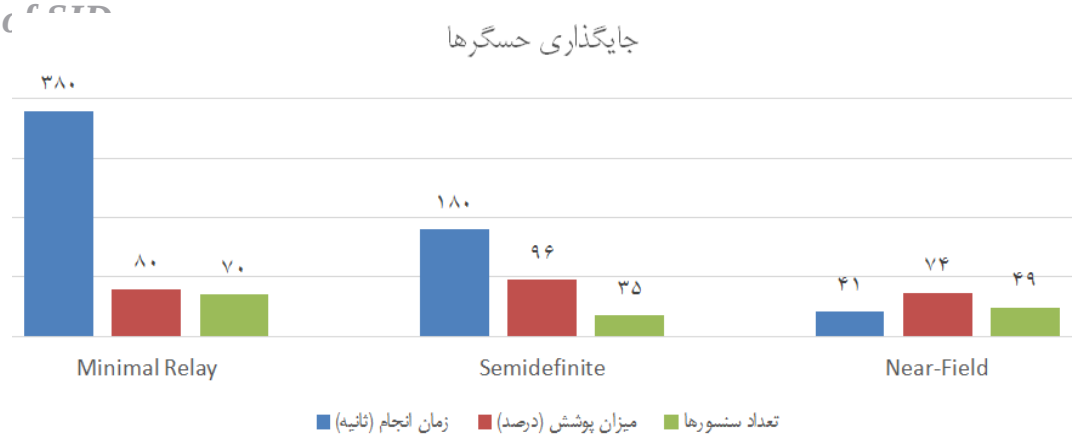
1. http://www.tinyos.net/
2. https://www.contiki.com/
3. https://github.com/twastica/stns

www.SID.ir

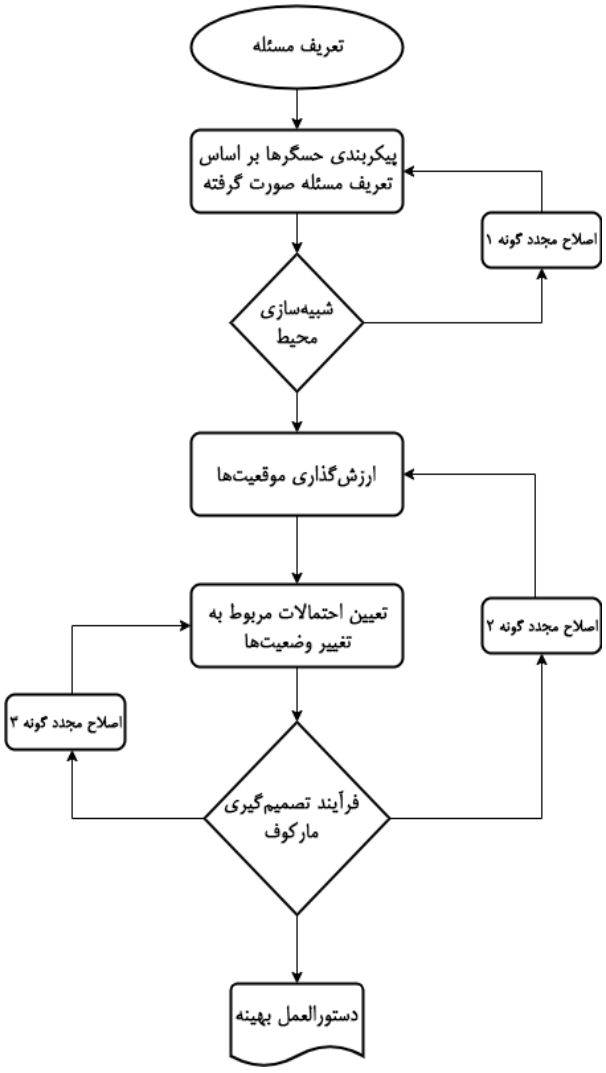
Archive of SID

www.SID.ir

Archive of SID



شکل ۱: مقایسه راهکارهای ارائه‌شده در [۴۶] تا [۴۸] به منظور جایگذاری حسگرها در محیط آزمایشی یکسان.



شکل ۲: روندنمای مراحل راهکار پیشنهادی.

ویژگی‌های منحصر به فردی می‌باشند که یکی از این ویژگی‌ها، تمایز قطعی میان شرایط ایستا و پویا در محیط پیاده‌سازی پایش‌های سازه‌ای است. برای مثال بسیاری از شرایط بیرونی سازه، پویا و دایماً در حال تغییر است، ولی شرایط تعیین‌کننده داخلی سازه مانند مکان اجزای سازنده (نظیر ستون‌ها و ...) یا کاملاً ثابت و ایستا هستند و یا تغییرات آنها به قدری کند است که می‌توان در مقیاس‌های پیاده‌سازی ما، آنها را ایستا در نظر گرفت. چنین شرایط بینابینی بهترین محیط را برای پیاده‌سازی روش‌های این مقاله که خود شبه‌پویا هستند در اختیار می‌گذارد.

در چنین محیطی می‌توان روش‌هایی گام‌به‌گام و نوین که علاوه بر دید علوم کامپیوتری از دید شهرسازی نیز مسئله را تجزیه و تحلیل می‌کند، ارائه داد [۴۹].

٤-۲ پایش سازه‌ای و امکان مقایسه روش‌ها

پایش سازه‌ای مبحثی است که به دلیل وجود موارد عملیاتی و همچنین فضای آزمایشی مورد توافق چهارچوب بسیار مناسبی برای بررسی راهکار پیشنهادی در حوزه شبکه‌های بی‌سیم و همچنین مقایسه آن با سایر روش‌ها و راهکارها می‌باشد. برای مثال [۵۰] تا [۵۲] در محیط‌های آزمایشگاهی مشابهی ارائه و پیاده‌سازی شده‌اند که در نتیجه آن به راحتی قابل مقایسه هستند.

در شکل ۲ روندنمای مربوط به مراحل راهکار پیشنهادی آورده شده است. در بخش‌های ۴-۳ تا ۴-۸ روش نگاشت مسأله بر روی هر یک از مراحل این مدل مشخص گردیده و به تفصیل توضیح داده خواهد شد. همچنین در ادامه در روندنمایی دیگر به بخش پیاده‌سازی فرایند تصمیم‌گیری مارکوف در این مدل به صورت مشروح خواهیم پرداخت.

٤-۳ صورت مسئله پایش سازه‌ای

با توجه به موارد گفته‌شده تا کنون، نیاز به صورت مسئله‌ای شفاف و با قابلیت پیاده‌سازی روش‌ها و راهکارهای مختلف به وضوح مشخص است. با توجه به پژوهش صورت‌گرفته، سازه مورد نظر هم می‌تواند به صورت مسطح و دوبعدی و هم به صورت پیچیده‌تر و سه‌بعدی در نظر گرفته شود که در آنها اتفاقاتی که می‌توانند محیطی و یا غیر محیطی باشند نیازمند اقداماتی هستند.

٤-٤ پیکربندی حسگرها

با توجه به اصول مقاله پیش رو حسگرها بایستی از نوع بیدارشونده باشند که بتوان با استفاده از راهکار ارائه‌شده در روشن و خاموش‌کردن بهینه حسگرها، مصرف انرژی را بهبود بخشید. این حسگرها قابلیت روشن و خاموش‌شدن با دستورات ساده را دارند. با توجه به هدف‌گذاری وسیع برای کاربرد این مقاله در حوزه پایش سلامت سازه‌ای بهتر است از حسگرهای فعال و یا نیمه‌منفعل استفاده شود که طبیعتاً در این صورت حسگرهای پژوهش دارای منبع انرژی محدود هستند.

حسگرها را در ۲ سناریوی مختلف به صورت متفاوت در راهکار ارائه‌شده این مقاله می‌توان در نظر گرفت. در سناریوی اول دارای تنها یک قابلیت حسی محیطی باشند و در سناریوی دوم به صورت چندهسته‌ای نهفته دارای دو قابلیت حسی متفاوت باشند که می‌توانند

www.SID.ir

Archive of SID

میان داشتن این قابلیت‌های حسی جابه‌جا شوند و این نکته مهم حایز اهمیت است که مصرف انرژی این حسگرها در حالت‌های با قابلیت حسی متفاوت، از یکدیگر متمایز است.

٤-٥ شبیه‌سازی محیط

به منظور شبیه‌سازی، محیط‌های گوناگونی در طی فرایند پژوهش مورد آزمایش و پیاده‌سازی قرار گرفته‌اند. محیط‌هایی نظیر CupCarbon، Contiki و TinyOs که در نهایت با توجه به صورت مسئله پایش سازه‌ای مطرح‌شده، پلتفرم شبیه‌سازی CupCarbon برای شبیه‌سازی صورت مسئله اجرایی بر اساس این مقاله پیشنهاد می‌گردد. این پلتفرم دارای محیط شبیه‌سازی دوبعدی می‌باشد که در آن ارتباطات به صورت خطی ساده شبیه‌سازی شده‌اند به گونه‌ای که پروتکل‌های ارتباطی ساده‌تر از سایر پلتفرم‌ها قابل استفاده است و این موضوع این پلتفرم را برای این پژوهش که تمرکزی بر پروتکل‌های ارتباطی ندارد مناسب می‌کند. از طرفی پلتفرم مذکور اطلاعات حس‌شده توسط حسگرها را به صورت شفاف و شماتیک منتقل می‌کند که در پژوهش اهمیت بالایی دارد. پلتفرم CupCarbon همچنین دارای رویکرد رویدادمحور است که اتفاقات قابل تشخیص توسط حسگرها در این پلتفرم در قالب یک رویداد تعریف و رفتارنویسی می‌شوند.

٤-٦ ارزش‌گذاری وضعیت‌ها

در پژوهش صورت‌گرفته، ارزش‌گذاری وضعیت‌ها از اهمیت بالایی برخوردار است. چه در هنگام استفاده از فرایند تصمیم‌گیری مارکوف و چه در بیدارشدن و خوابیدن ساده حسگرها، شبکه و حسگرها بایستی بر اساس وضعیت خود تصمیم به انجام عملی بگیرند. اگرچه در برخی پژوهش‌هایی نظیر [۵۳] تصمیم‌گیری بر اساس وضعیت‌های احتمالی در آینده نیز صورت می‌گیرد ولی اغلب پژوهش‌ها [۵۴] تا [۵۶] همانند این پژوهش بر روی وضعیت فعلی یا ترکیبی از وضعیت فعلی و وضعیت گذشته تمرکز دارند. شایان ذکر است، هنگامی که مقالات بر روی پیش‌بینی آینده تمرکز دارند، عملاً بر اساس دسته اطلاعاتی که به عنوان حالت فعلی در نظر گرفته می‌شود، پیش‌بینی انجام می‌گردد. برای مثال در [۵۰] برای پایش سازه‌ای پل، حسگرهایی در فواصلی دورتر از پل در نظر گرفته شده است. این حسگرها که به منابع نامحدود انرژی دسترسی دارند، همواره فعال هستند و با حس باد، سیگنال بیدارکننده را به حسگرهای بیدارشونده مستقر بر روی پل ارسال می‌کنند. در این حالت چنین رویکردی را هم می‌توان پیش‌بینی آینده به حساب آورد و هم می‌توان علامت بیدارکننده را ورودی لحظه حال به حساب آورد.

٤-٧ احتمالات تغییر وضعیت‌ها

در پژوهش صورت‌گرفته برای تغییر حالت‌های احتمالاتی که خود حسگرها و شبکه در آن دخالتی ندارند بایستی یک مدل احتمالاتی تعبیه گردد. برای مثال اگر شبکه حسگر بی‌سیم وظیفه رصد هوای بارانی یا خشک را دارد، شبکه باید از احتمال وقوع باران در این لحظه اطلاع داشته باشد. طبیعتاً در پیاده‌سازی شبکه مورد پژوهش در این مقاله بایستی در هر روز چنین احتمالاتی بر اساس اطلاعات لحظه‌ای هواشناسی محلی به روز رسانی گردد. به منظور ساده‌سازی و وحدت رویه در مقاله پیش رو در نمونه تک‌حسگره در هر لحظه از زمان، احتمال بارانی‌شدن هوا، ۰/۶ و احتمال خشک‌شدن هوا ۰/۴ در نظر گرفته شد. ولی با پیشبرد کار و استفاده از حسگرهای بیشتر عملاً ساده‌سازی چنین احتمال پیچیده‌ای به نتایج حاصل آسیب می‌زند و بنابراین (۲) برای این منظور ارائه و استفاده شده است. این فرمول وضعیت حس‌شده توسط حسگرهای مجاور را در احتمال تغییر وضعیت حسگر مورد نظر تأثیر می‌دهد. در این فرمول، احتمالات تغییرات آب و هوا بر مبنای سابقه هواشناسی و همچنین میزان تشابه بین هر دو گره، مدل گردیده است. همچنین مدل‌سازی میزان تشابه مذکور به صورت جداگانه و در (۳) آمده است. در این مدل‌سازی آینده، بر اساس شاخص ثابت هواشناسی در هر گره و همچنین میانگینی وزنی از وضعیت دیگر گره‌ها پیش‌بینی می‌گردد

$$P_i = P_f + \frac{\sum_{j=1}^{n}(S_{i,j} \times P_j)}{n} \qquad (۲)$$

که P_i احتمالات تغییر وضعیت‌ها در حالت i، P_f احتمالات ثابت هواشناسی برای بارندگی که بر اساس داده‌های سالانه هواشناسی اعمال می‌شود و $S_{i,j}$ میزان شباهت گره i با گره j است

$$S_{i,j} = \alpha Sim_{i,j} + \beta Conn_{i,j} + \gamma Sens_{i,j} \qquad (۳)$$

که $Sim_{i,j}$ میزان نزدیکی دو گره از نظر موقعیت مکانی فعال در سازه، $Conn_{i,j}$ میزان وجود ارتباط فیزیکی بین دو گره (برای مثال به منظور انتقال رطوبت) و $Sens_{i,j}$ میزان تشابه حسگرهای فعال در گره است. α، β و γ عبارت است از ضرایبی که مجموع آنها ۱ می‌باشد و همچنین کاربرد آنها به منظور اتخاذ سیاست‌های متنوع است.

٤-٨ فرایند تصمیم‌گیری مارکوف

تصمیم‌گیری اصلی بر عهده فرایند تصمیم‌گیری مارکوف خواهد بود. در این فرایند، ارزش‌گذاری وضعیت‌ها، احتمالات تغییر وضعیت‌ها و همچنین γ و ε به عنوان ورودی به فرایند وارد می‌شود. پس از اجرای فرایند که مدت زمان و انرژی زیادی نیز لازم دارد سیاست بهینه ساخته خواهد شد که این سیاست یک دستورالعمل ساده و کم‌حجم می‌باشد [۱۳] که به ازای هر حالت فعلی اقدام بهینه برای شبکه حسگر بی‌سیم تعیین شده است. این پژوهش از این رو رویکرد منفعلانه را انتخاب کرده که در این گام، فرایند تصمیم‌گیری به صورت آفلاین اجرا شده و سیاست بهینه در اختیار شبکه قرار می‌گیرد زیرا به دلیل مصرف انرژی بالا امکان‌پذیر نیست که شبکه دایماً در حال حل مسئله و تغییر سیاست بهینه به صورت فعالانه باشد.

روندنمای مربوط به فرایند تصمیم‌گیری مارکوف پیاده‌سازی شده در شکل ۳ آمده است. ۶ گام از شیوه پژوهش که تا به اینجا توضیح داده شد، در قالب روندنمایی در این شکل آمده است. در شکل همچنین تلاش گردیده که نحوه توالی فعالیت‌ها و همچنین رابطه‌ها آنها با یکدیگر شفاف‌تر بیان شود.

گام‌های اصلاح مجدد[1] که در شکل ۲ آورده شده است به سه گونه صورت می‌پذیرد.

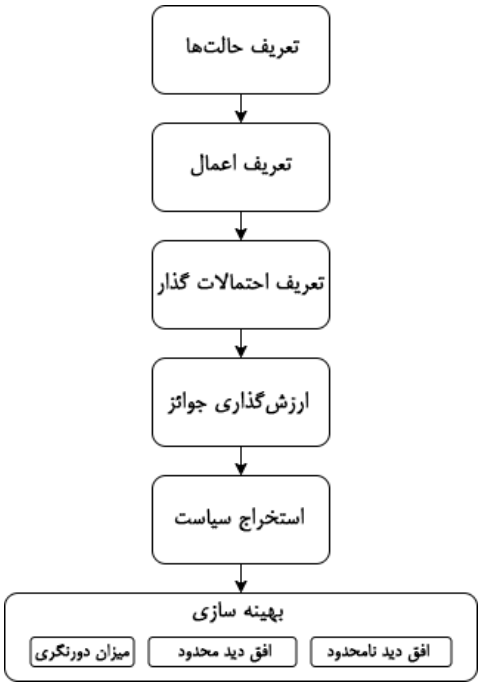
گونه ۱

در این گونه، قبلاً محیطی که مسئله در آن تعریف گردید، شبیه‌سازی شده است. حال با استفاده از شبیه‌سازی صورت‌گرفته، به بهبودهایی در خصوص پیکربندی اولیه حسگرها دست یافته‌ایم که با توجه به آنها بایستی بهبودهایی به صورت بازگشتی چندین و چندین بار صورت پذیرد تا میزان تغییرات در هر چرخه به حداقل برسد. برای این اصلاح مجدد از

1. Refactoring

www.SID.ir

Archive of SID



شکل ۳: روندنمای مربوط به پیاده‌سازی فرایند تصمیم‌گیری مارکوف.

روش‌های ارائه‌شده تحت عنوان BAS[1] و BCEA[2] استفاده می‌کنیم که در [۵۷] آمده است.

لازم به ذکر است علت این که شبیه‌سازی محیط به عنوان گام اول انتخاب نشد این است که بر خلاف این که از لحاظ نظری می‌توان به بهینه‌ترین حالت با در نظر گرفتن شبیه‌سازی کامل محیط و همچنین دسترسی به تمام تکنولوژی‌های موجود در حوزه حسگرها داشت، ولی در عمل چنین دایره دانشی غیر ممکن بوده و یا در صورت امکان به دلیل حجم پردازش بالا غیر قابل استفاده خواهد بود. از این رو بایستی به گونه‌ای بازگشتی و با استفاده از چرخه‌ای تجربی پیاده‌سازی گردد.

گونه ۲

در این اصلاح مجدد هر بار که دستورالعمل بهینه، توسط فرایند تصمیم‌گیری مارکوف ساخته شد، با تکرار چرخه ارزش‌گذاری موقعیت‌ها می‌توان آن را بهینه‌سازی کرد. این تکرار چرخه می‌تواند با استفاده از [۵۸] صورت پذیرد و ملاک انجام تغییرات نیز بایستی تحلیل دستورالعمل خروجی باشد. این تحلیل را به دو بخش تقسیم کرده‌ایم: ۱) سنجش فاکتور عملیاتی‌بودن دستورالعمل‌ها، به این معنا که در مسایل پیچیده ممکن است بنا به ارزش‌گذاری موقعیت‌ها برای رسیدن به کمترین خطا، به حدی پاداش‌های منفی افزایش یابد که شبکه به نوعی در حالت همیشه روشن قرار بگیرد و بنا به دلایل بسیاری از جمله مصرف انرژی و طول عمر شبکه باید از چنین وضعیتی دوری کنیم. ۲) پیاده‌سازی دستورالعمل در شبیه‌سازی و سنجش میزان کارایی به صورت دوره‌ای با اعمال ارزش‌گذاری موقعیت‌های متفاوت.

گونه ۳

در اصلاح مجدد گونه ۳، در واقع احتمالات تغییر وضعیت‌ها به روز خواهند شد. بر اساس دلایلی که اشاره شد، راهکار این مقاله تنها برای سازه‌ها ارائه شده و در این سازه‌ها هر آنچه شرایط محیطی ثابت و غیر قابل تغییر تعبیر می‌شوند در مرحله شبیه‌سازی محیط، مشخص می‌گردند و هر آنچه شرایط محیطی تغییرپذیر تعبیر می‌گردند از جمله شرایط آب و هوایی که حتی برای یک سازه در فصول مختلف متفاوت است، در مرحله احتمالات تغییر وضعیت‌ها مشخص می‌شوند و در نتیجه بایستی به صورت موردی و یا دوره‌ای به روز گردند.

٤-۹ نمونه عملیاتی پل

نمونه کوچکی را در نظر می‌گیریم تا روند پیاده‌سازی شرح داده شود. در این نمونه یک پل کوچک فرضی تصور شده که در آن به دلایلی بررسی بارندگی و رطوبت از اهمیت بالایی برخوردار است. در این نمونه کوچک به دلیل ساده‌سازی از دو حسگر بی‌سیم استفاده خواهیم کرد. چنانچه بدان پرداخته شده است به منظور پیاده‌سازی روش پیشنهادی بایستی ۶ مرحله طی گردد که در ادامه به این ۶ مرحله می‌پردازیم.

٤-۹-۱ صورت مسئله

صورت مسئله عبارت است از پایش سازه‌ای رطوبت در خصوص یک پل که در آن تهدید اصلی برای سیستم هنگامی است که شرایط رطوبت فراهم شده و هیچ یک از دو حسگر فعال و آماده نباشند.

٤-۹-۲ پیکربندی حسگرها

در گام بعدی پیکربندی حسگرها را پیش رو داریم و حسگرها را به صورت دارای حسگر رطوبت، قابلیت بیدارشوندگی، حافظه محدود به منظور ذخیره دستورالعمل‌ها و گستره ارتباطی محدود به منظور ارتباط با یکدیگر (شعاع گستره ارتباطی ۱٫۲ فاصله مابین دو حسگر می‌باشد) پیکربندی می‌کنیم.

٤-۹-۳ شبیه‌سازی محیط

در گام سوم بایستی به شبیه‌سازی محیط بپردازیم. در این گام محیطی را در نظر می‌گیریم که در ۶۰ درصد مواقع خشک و در ۴۰ درصد مواقع بارانی است و به عبارتی در هر لحظه از زمان، لحظه بعدی به احتمال ۶۰ درصد خشک و ۴۰ درصد بارانی خواهد بود.

٤-۹-٤ ارزش‌گذاری وضعیت‌ها

در گام چهارم بایستی به ارزش‌گذاری وضعیت‌ها پرداخته شود. این مرحله خود بایستی به صورت الگوریتم یک و با استفاده از روش‌هایی نظیر [۵۸] پیاده‌سازی گردد. در این صورت مسئله که ساده می‌باشد با استفاده از قوانین ساده مشروح در جدول ۱ گوشه‌ای از جدول ارزش‌گذاری برای این نمونه به نمایش درآمده است، جدول کامل در آدرس مخزن مقاله قابل مشاهده می‌باشد. وضعیت در لحظه هر کدام از گره‌ها به صورت یک گزاره شش‌بخشی تعریف گردیده که از چپ به راست هر کدام از عددها بیانگر موارد زیر هستند و در ستون دوم جدول ۱ آورده شده است:

عدد اول: وضعیت روشن (۱) و خاموش (۰) بودن حسگر شماره ۱
عدد دوم: خروجی حسگر شماره ۱، به صورتی که ۱ بیانگر وجود رطوبت، ۰ بیانگر فقدان رطوبت و x بیانگر حالتی نامعلوم می‌باشد.
عدد سوم: بیانگر میزان باتری حسگر شماره ۱ در چهار حالت (۰ تا ۳) می‌باشد.
عدد چهارم: وضعیت روشن (۱) و خاموش (۰) بودن حسگر شماره ۲
عدد پنجم: خروجی حسگر شماره ۲، به صورتی که ۱ بیانگر وجود رطوبت، ۰ بیانگر فقدان رطوبت و x بیانگر حالتی نامعلوم می‌باشد.
عدد ششم: بیانگر میزان باتری حسگر شماره ۲ در چهار حالت (۰ تا ۳) می‌باشد.

1. Beetle Antennae Search
2. Beetle-Swarm Evolution Competitive Algorithm

www.SID.ir

Archive of SID

جدول ۱: ارزش‌گذاری وضعیت‌ها.

ردیف	وضعیت در لحظه	ارزش‌گذاری
۱	(۰ x ۳۰ x ۳)	−۰٫۲
...	...	...
۲۰	(۰ x ۳۱۰۰)	۰
...	...	...
۵۷	(۱۰۱۰ x ۳)	۰٫۷۵
...	...	...
۷	(۱۰۲۱۰۲)	−۰٫۴
...	...	...
۷۹	(۱۰۰۱۰۱)	−۰٫۷۵
...	...	...
۹۷	(۱۱۳۰ x ۳)	۱
...	...	...
۱۰۲	(۱۱۲۰ x ۲)	۰٫۹
...	...	...
۱۰۳	(۱۱۲۰ x ۱)	۰٫۸
...	...	...
۱۲۲	(۱۱۱۱۰۲)	۰٫۱
...	...	...
۱۴۴	(۱۱۰۱۱۰)	−۱

جدول ۳: سیاست تصمیم‌گیری.

ردیف	وضعیت در لحظه	اقدام بهینه
۱	(۰ x ۳۰ x ۳)	−۱ روشن
...	...	
۲۰	(۰ x ۳۱۰۰)	−۱ خاموش
...	...	
۵۷	(۱۰۱۰ x ۳)	هیچ
...	...	
۷۰	(۱۰۲۱۰۲)	−۱ خاموش
...	...	
۷۹	(۱۰۰۱۰۱)	−۰ خاموش
...	...	
۹۷	(۱۱۳۰ x ۳)	هیچ
...	...	
۱۰۲	(۱۱۲۰ x ۲)	هیچ
...	...	
۱۰۳	(۱۱۲۰ x ۱)	هیچ
...	...	
۱۲۲	(۱۱۱۱۰۲)	−۰ خاموش
...	...	
۱۴۴	(۱۱۰۱۱۰)	−۰ خاموش

در ادامه، ستون سوم جدول ۱ بیانگر میزان ارزشی است که به هر یک از حالت‌ها اختصاص داده شده است.

٤-۹-۵ احتمالات تغییر وضعیت‌ها

در این مرحله با در نظر گرفتن مراحل پیکربندی حسگرها و شبیه‌سازی محیط، احتمالات تغییر وضعیت‌ها مشخص می‌شوند. این احتمالات در جدولی مطابق جدول ۲ محاسبه شده‌اند و این جدول در نسخه کامل شامل ۹۹۶ ردیف بوده که در آدرس مخزن مقاله نسخه کامل آن در

www.SID.ir

جدول ۲: احتمالات تغییر وضعیت‌ها.

ردیف	وضعیت در لحظه	اقدام	وضعیت آینده پس از اقدام	احتمال
۱	(۰ x ۳۰ x ۳)	هیچ	(۰ x ۳۰ x ۳)	۱
...	...	...	...	...
۱۰۶	(۰ x ۳۱ x ۲)	−۰ روشن	(۱۰۲۱۰۲)	۰٫۵۵
...	...	...	...	...
۲۴۳	(۱۰۱۰ x ۳)	−۰ خاموش	(۰ x ۱۰ x ۳)	۱
...	...	...	...	...
۳۰۹	(۱۰۳۰ x ۲)	−۱ روشن	(۱۱۲۱۱۱)	۰٫۴۵
...	...	...	...	...
۴۷۴	(۱۰۲۱۱۲)	−۰ خاموش	(۰ x ۲۱۰۲)	۰٫۸
...	...	...	...	...
۵۵۰	(۱۰۳۱۱۲)	هیچ	(۱۰۲۱۰۱)	۰٫۶
...	...	...	...	...
۶۹۱	(۱۱۱۰ x ۱)	−۱ روشن	(۱۱۰۱۰۰)	۰٫۴۵
...	...	...	...	...
۷۷۷	(۱۱۱۱۰۱)	−۱ خاموش	(۱۰۱۰ x ۱)	۰٫۸
...	...	...	...	...
۸۴۵	(۱۱۲۱۰۱)	هیچ	(۱۱۱۱۱۰)	۰٫۴
...	...	...	...	...
۹۵۸	(۱۱۳۱۱۰)	−۱ خاموش	(۱۱۲۰ x ۰)	۰٫۷

دسترس می‌باشد. شرح یک ردیف از جدول ۲ به شرح زیر می‌باشد:

ستون دوم: عبارت است از وضعیت در لحظه فعلی که در بخش پیشین در خصوص نحوه تفسیر این وضعیت توضیح داده شده است.

ستون سوم: عبارت است از اقدامی که در وضعیت فعلی (ستون اول) اتخاذ می‌گردد.

ستون چهارم: عبارت است از وضعیت بعدی که با اتخاذ اقدام ستون دوم، به احتمال مندرج در ستون پنجم به آن خواهیم رسید.

ستون پنجم: عبارت است از میزان احتمالی که با اقدام ستون سوم از حالت ستون دوم به حالت ستون چهارم خواهیم رسید.

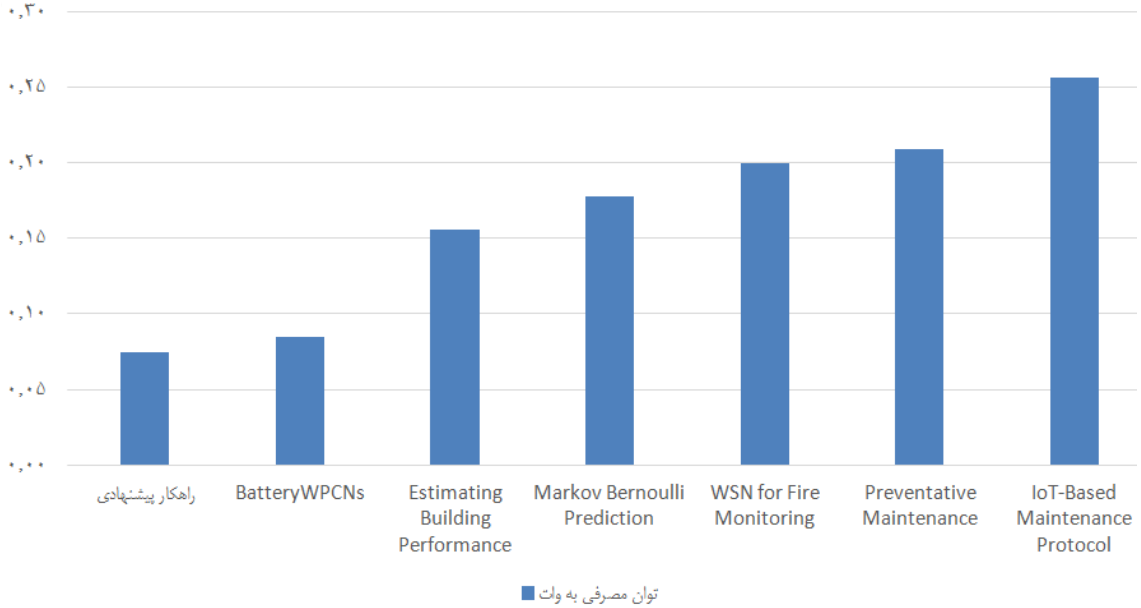
٤-۹-٦ فرایند تصمیم‌گیری مارکوف

در این نمونه، نتایج موجود در جدول ۳ از فرایند تصمیم‌گیری مارکوف به دست می‌آیند. همان طور که مشاهده می‌کنید، برای این مسئله ۱۴۴ وضعیت ارزش‌گذاری شده‌اند که حاکی از دقت در نظر گرفتن حالت‌های مختلف برای ارائه راهکار بهینه می‌باشد. در جدول ۳ پس از انجام راهکار مقاله برای هر یک از این حالت‌ها، اقدام متناسب لیست شده که در واقع نقشه راهی دقیق برای سیستم است که در هر وضعیت بایستی چه اقدامی را صورت دهد. ذخیره‌سازی چنین دستورالعملی نیازمند ۳ کیلوبایت فضای ذخیره‌سازی در هر یک از حسگرها می‌باشد که بایستی در خصوص پیکربندی حسگرهای بی‌سیم در نظر گرفته شود. در جدول ۳ ستون دوم عبارت است از وضعیتی که در لحظه فعلی در آن هستیم و ستون سوم عبارت است از اقدام بهینه‌ای که در این لحظه اتخاذ خواهیم نمود.

۵- آزمایش‌ها و نتایج

پس از معرفی و تشریح حوزه‌ها و همچنین رویکردهای گوناگون حوزه پایش سازه‌ای، در این بخش مقایسه‌ای جامع و دقیق از جدیدترین و کاراترین رویکردهای پایش سازه‌ای با الگوریتم پیشنهادی آورده شده است، به گونه‌ای که سعی گردیده سه شاخص مهم و کلیدی این حوزه

Archive of SID



شکل ۴: مقایسه راهکارها بر اساس توان مصرفی.

یعنی دقت، طول عمر شبکه و همچنین مصرف انرژی مورد بررسی قرار گیرد. این مقایسه بر اساس شاخص‌هایی انجام می‌گیرد که بر طبق آنها بهبود و یا افت عملکرد در الگوریتم پیشنهادی قابل مشاهده باشد.

همانند بسیاری از مطالعات در حوزه شبکه حسگرهای بی‌سیم نظیر [۵۹]، اولین موضوع مورد آزمایش، میزان مصرف انرژی است. در حسگرهایی که از داشتن منبع تغذیه محروم هستند، طول عمر، وابسته به مصرف باتری و ظرفیت آن است. هرچه این طول عمر بالاتر باشد، طول عمر کل سیستم نیز بالاتر و طبیعتاً برای کاربرد واقعی، به‌صرفه‌تر خواهد بود.

با توجه به محدودیت‌های فراوان موجود در حوزه شبکه حسگرهای بی‌سیم، توجه به نحوه عملکرد سیستم در تبادلات پیام‌ها بسیار مهم است. این اهمیت از دو بعد حجم و تعداد، قابل بررسی است.

موفقیت هر سیستم نظارتی، نموداری از تعداد تشخیص‌های درست آن است. در پایش سلامت سازه‌ای، این امر به صورت تعداد تشخیص‌های درست در موارد خرابی نشان داده می‌شود. هرچه تعداد تشخیص‌های درست در شرایط بحرانی و در نتیجه گزارش این بحران، بالاتر باشد، پایش ارزشمندتر است.

علاوه بر این که یک سیستم پایشگر به‌روز، باید خطا و مشکل را به درستی گزارش کند، سرعت تشخیص و گزارش بحران توسط شبکه حسگرهای بی‌سیم نیز مهم است. اگر در لحظات آخر آتش‌سوزی، سیستم گزارش آتش را به متصدی امر ارائه نماید، نمی‌توان از بروز فاجعه جلوگیری کرد، هرچند که سیستم به درستی تشخیص بروز بحران را داده است. بنابراین اگر سیستم در اولین لحظات و یا حتی قبل از بروز بحران و یا حادثه‌ای آن را گزارش کند، میزان سلامت سازه در طولانی‌مدت، بالاتر خواهد رفت.

یکی از مهم‌ترین چالش‌های سیستم‌های نظارتی، مجموع هزینه‌های لازم به جهت استفاده واقعی و تجاری از یک سیستم پایش سلامت سازه‌ای است. اگر تجهیزات مورد نیاز برای تبادل اطلاعات و یا پردازش مقرون به صرفه باشد، امکان رشد آن سیستم بالاتر می‌رود. برای کاهش هزینه‌ها، مطالعات موجود در این حوزه، تلاش دارند که حداقل ابزار لازم به جهت تشخیص، پردازش، ارتباط و تصمیم‌گیری را استفاده نمایند.

در ادامه این بخش، الگوریتم ارائه‌شده از جنبه‌های مختلف بررسی خواهد شد و همچنین این نتایج با دیگر تحقیقات این حوزه [۶۰] تا [۶۵] نیز مقایسه می‌گردند.

۵-۱ مصرف باتری در هر حسگر

در شکل ۴ راهکار ارائه‌شده به صورت پروژه‌محور با پروژه‌های مختلف در حوزه‌های مختلف شبکه‌های حسگر بی‌سیم از لحاظ میزان مصرف انرژی مقایسه گردیده است. در این مقایسه میزان مصرف انرژی متوسط گره‌های حسگر با استفاده از منبع تغذیه‌های ۳٫۳ V برای آنها در نظر گرفته شده است.

همان طور که قابل ملاحظه است، مصرف انرژی راهکار پیشنهادی بهترین کارایی (کمترین مصرف) را از خود نشان داده که با توجه به کاربرد پرمصرف خود نسبت به مواردی نظیر شبکه ارتباطی و ردیابی لوازم بسیار حایز اهمیت می‌باشد.

۵-۲ زمان زنده‌ماندن

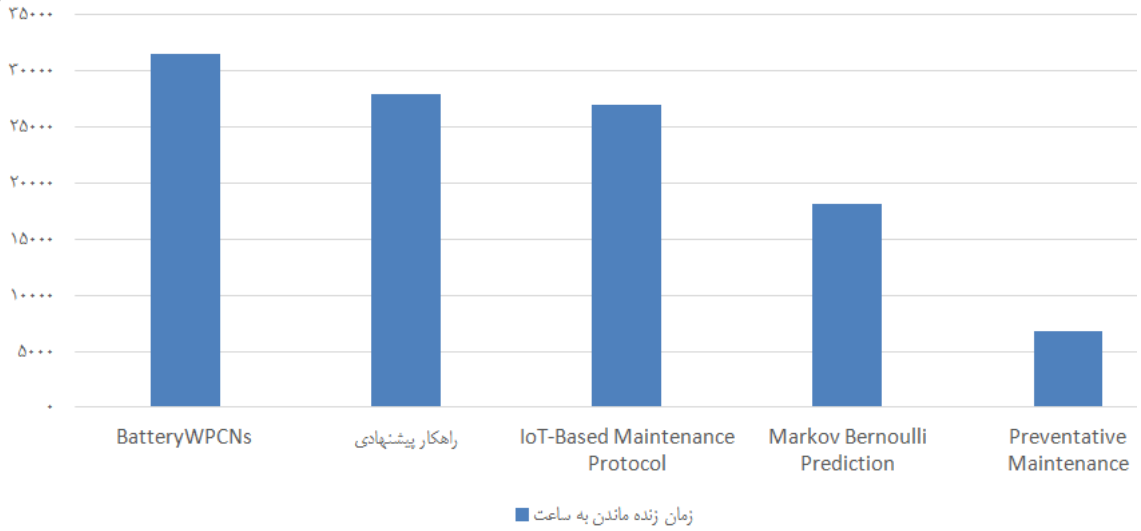
در این بخش به بررسی و مقایسه میزان زنده‌ماندن کل شبکه پایش سازه‌ای در راهکار ارائه‌شده و همچنین در سایر راهکارها خواهیم پرداخت. پایش سازه‌ای خود صورت مسایل متنوعی را شامل می‌گردد که در اینجا آنها به دو دسته عمده تقسیم می‌شوند:

- پایش سازه‌ای با اهمیت پایش محلی
- پایش سازه‌ای با اهمیت پایش اجمالی

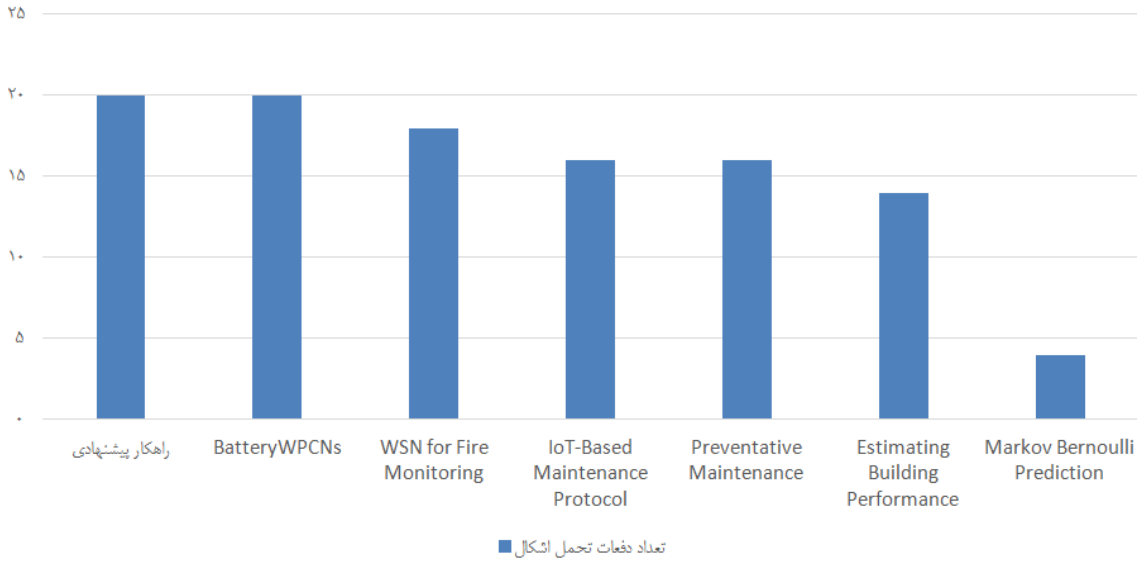
سازه‌ای همانند یک بنای تاریخی نظیر گنبد سلطانیه را در نظر بگیرید که قصد پایش کاشی‌کاری‌های آن را داریم. در چنین حالتی اهمیت زنده‌ماندن کل شبکه کمتر از حالتی است که قصد پایش سلامت گنبد سازه را داریم. در حالت اول که آن را پایش سازه‌ای با اهمیت پایش محلی می‌نامیم، پس از از دست دادن بخشی از شبکه نیز با وجود خطرات احتمالی همچنان بخش زیادی از پروژه با اطمینان پیش می‌رود. ولی در حالت دوم که آن را پایش سازه‌ای با اهمیت پایش اجمالی می‌نامیم، در صورتی که بخشی از شبکه را از دست بدهیم، خطر جدی را پذیرفته و خطر، کل سازه گنبد را تهدید می‌کند، چرا که در صورت ریزش بخشی از گنبد، تمامی آن فرو خواهد ریخت. بنابراین در حالت دوم، خطر ناشی از این که بخشی از شبکه مختل شود بسیار بالا بوده و تقریباً برابر با

www.SID.ir

Archive of SID



شکل ۵: مقایسه راهکارها بر اساس زمان زنده‌ماندن.



شکل ۶: مقایسه راهکارها بر اساس تعداد دفعات تحمل اشکال.

خاموشی کل شبکه در نظر گرفته می‌شود. توضیحات واردشده از این منظر حایز اهمیت بود که در مقایسه‌ای که در ادامه مطرح می‌شود، صورت مسئله از نوع پایش سازه‌ای با اهمیت پایش اجمالی در نظر گرفته شده و بنابراین با خاموش‌شدن بخشی از شبکه کل شبکه را از دست رفته متصور می‌شویم. در این مقایسه همان طور که در شکل ۵ مشخص می‌باشد، در میان موارد مقایسه‌ای از نظر زمان زنده‌ماندن، راهکار پیشنهادی در مرتبه ۲ قرار گرفته که خود نتیجه مناسبی بوده و طبیعتاً با افزایش پاداش منفی از دست رفتن گره در فرایند مارکوف می‌توان این زمان زنده‌ماندن را بیشتر هم نمود ولی این عمل تأثیراتی بر روی مواردی نظیر مصرف انرژی می‌گذارد.

۵-۳ تبادل پیام‌ها

مقایسه وضعیت تبادل پیام‌ها از منظر تحمل‌پذیری اشکال مورد بررسی گرفته است، بدین معنی که راهکار پیشنهادی در مقایسه با راهکارهای دیگر چه جوانب مثبت و منفی‌ای را در خصوص درست‌رساندن پیام‌ها و تحمل اشکال در هنگام انتقال پیام‌ها دارد.

افزایش میزان تحمل‌پذیری اشکال، در راهکار پیشنهادی عملاً به بخش سه‌گانه گام‌های اصلاح مجدد مربوط می‌شود:

۱) در گام اول اصلاح مجدد، شبیه‌سازی محیط به صورت چرخه‌ای اصلاح می‌گردد و این شبیه‌سازی شامل افزایش دقت در میزان احتمال خطای سنسورها و همچنین اشکال در شبکه می‌باشد.

۲) در گام سوم اصلاح مجدد که احتمالات تغییر وضعیت‌ها به روز می‌گردند مهم‌ترین بخش از تحمل‌پذیری اشکال پیشگیرانه، راهکار پیش رو را شامل می‌شود. در صورتی که تعداد شبیه‌سازی‌ها تا حد مورد نیاز بالا رود، بر اساس تحلیل نتایج به دست آمده و همچنین دستورالعمل بهینه با تغییر در پاداش و جزای فرایند تصمیم‌گیری مارکوف، تحمل‌پذیری کل سیستم در برابر اشکال افزایش خواهد یافت.

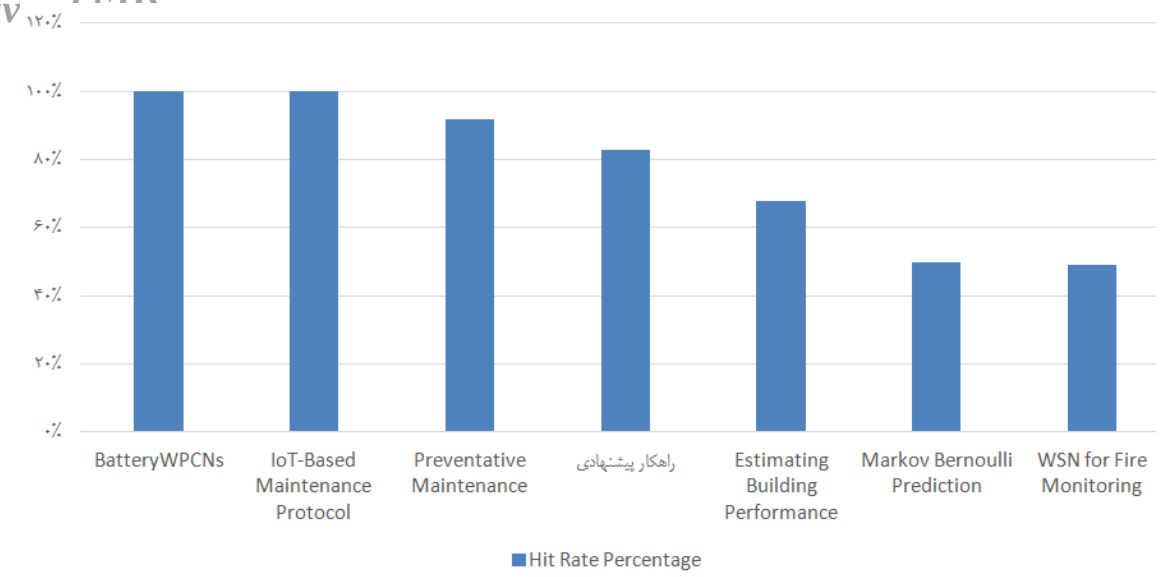
در خصوص مورد اول میزان تأثیر مشخص است ولی با توجه به این که محیط شبیه‌سازی‌شده برای تمامی روش‌ها در این قسمت یکسان بوده است، تأثیری چندانی در این مقایسه ندارد. اما در خصوص مورد دوم با اعمال (۲)، نتایج شکل ۶ به دست آمده‌اند.

۵-۴ Hit Rate

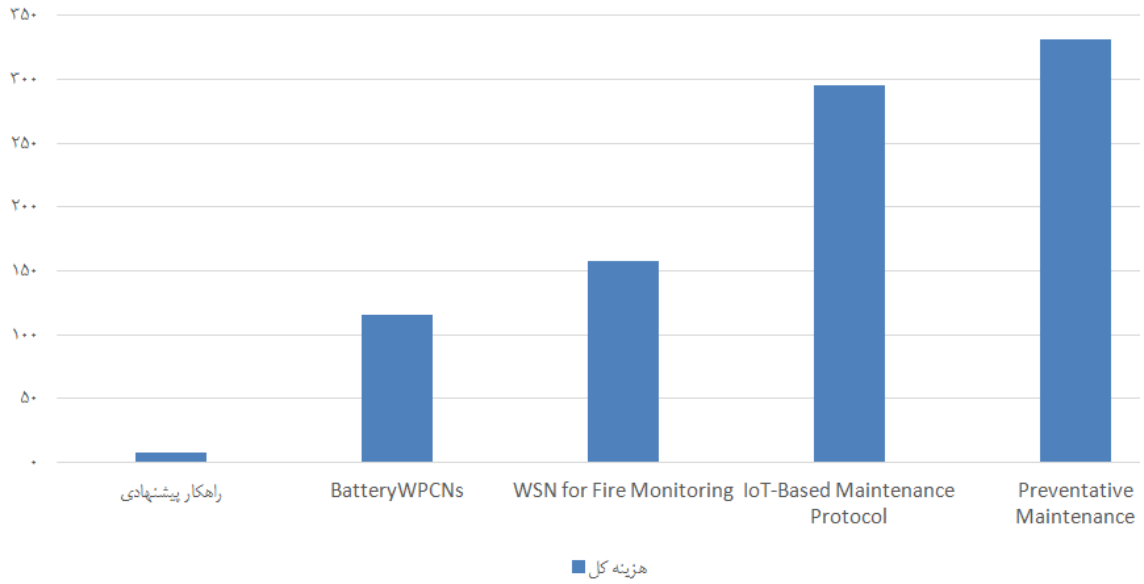
در خصوص Hit Rate، بدیهی است که Hit Rate راهکار پیشنهادی نسبت به روش‌هایی نظیر استفاده از شبکه‌های حسگر بی‌سیم که تمامی

www.SID.ir

Archive of SID



شکل ۷: مقایسه راهکارها بر اساس Hit Rate.



شکل ۸: مقایسه راهکارها بر اساس هزینه کل.

حسگرها همواره فعال هستند کمتر خواهد بود. بنابراین در شکل ۷ نیز راهکار پیشنهادی این مقاله را با روش‌هایی که از شبکه‌های حسگر بی‌سیم استفاده کرده‌اند، مقایسه کرده‌ایم.

همان طور که از نتایج به دست می‌آید، نتایج قابل توجه بخش‌های قبلی در این حوزه برای راهکار پیشنهادی تکرار نشده‌اند که دلیل آن را می‌توان این دانست که اکثر روش‌های مقایسه‌شده از حسگرهای کاملاً بیدار استفاده می‌کنند و در راهکار پیشنهادی که چنین نیست، عدم تشخیص‌هایی به دلیل خاموش‌بودن موقت گره طبیعی می‌باشد.

۵-۵ هزینه

مبحث هزینه برای یک شبکه حسگر بی‌سیم که در حال پایش یک سازه می‌باشد، در مقایسه با شبکه‌های سیمی به مراتب کمتر است و از این رو تمامی الگوریتم‌ها و راهکارهای امروزه که از حسگرهای بی‌سیم بهره می‌برند از لحاظ میزان هزینه قابل قبول می‌باشند. ولی با این حال اختلافات ریز هزینه‌ای در مقیاس کلان و تولید صنعتی می‌تواند قابل توجه باشد. در ادامه هزینه‌های پیاده‌سازی این مقاله با مقالاتی که بنا به آنچه دیده شد از نظر کارایی در سطح نزدیکی با راهکار مطرح‌شده در این مقاله هستند، مقایسه شده است.

در شکل ۸ راهکارهای مذکور بر اساس هزینه با یکدیگر مقایسه شده‌اند و همچنین ریز هزینه مقایسه‌ها در جدول ۴ آمده است. در این مقایسه، محیط شبیه‌سازی همان محیط شبیه‌سازی پیشین بوده و بنابراین بسته به راهکار مورد نظر تعداد حسگرهای استفاده‌شده متفاوت می‌باشد و همچنین لازم به ذکر است که قیمت‌ها به دلار آمریکا هستند.

در جدول ۴ هزینه پردازنده مرکزی مربوط به راهکار پیشنهادی به آن دلیل صفر در نظر گرفته شده است که پردازش برای این راهکار به صورت پیش‌پردازش می‌باشد و در واقع برای یک صورت مسئله مطابق مراحل بخش ۴-۲، مسئله ابتدا به صورت کامل حل شده و پاسخ در اختیار شبکه حسگرها در پیکربندی آغازین قرار می‌گیرد. در حالی که در سایر ردیف‌ها واحد پردازنده مرکزی دایماً در شبکه حضور داشته و به ایفای نقش می‌پردازد.

۶- نتیجه‌گیری

راهکار ارائه‌شده در این مقاله، فرایند پایش سلامت سازه را با استفاده از فرایند تصمیم‌گیری مارکوف، بهبود می‌بخشد و تلاش می‌کند حضور و

www.SID.ir

Archive of SID

دخالت نیروی انسانی را در امر پایش کم‌رنگ کند. این مقاله با بهره‌گیری از شبکه حسگرهای بی‌سیم، راهکاری برای نظارت بر روی سازه‌های مختلف ارائه می‌کند که در آن هر حسگر با نقشی مستقل عمل کرده و سعی می‌کند با تشخیص درست وضعیت اطراف خود (رطوبت، آتش و یا مخاطرات این گونه) از بروز بحران جلوگیری نماید. این راهکار در درجه اول به صورت غیر مرکزی و خودآگاه می‌باشد که همچنین در برابر تغییرات محیطی، تحمل‌پذیر است و باعث افزایش قابلیت اتکا به سیستم‌های پایش سلامت سازه‌ای می‌گردد. در درجه دوم با توجه به ساختار این راهکار که به صورت شبه‌پویا طراحی شده است به گونه‌ای که با وجود تصمیم‌گیری هوشمند این پردازش و تصمیم‌گیری در حین اجرا صورت نمی‌پذیرد، مصرف منابع برای استفاده در طولانی‌مدت بهینه گردانیده که این امر خود موجب کاهش نیاز به حضور نیروی انسانی است. همچنین مصرف همگن حسگرها به دلیل استفاده از این راهکار نوین، موجب حذف وظایف کوتاه دوره برای بازدید شده و می‌توان نگهداری و تعمیرات این سیستم را به صورت فرایندی یک‌جا و جمعی انجام داد.

در خصوص ادامه مسیر برای این پژوهش می‌توان به مواردی که در ادامه می‌آیند اشاره کرد:

- پیاده‌سازی راهکار به صورت کاملاً پویا و مقایسه نتایج حاصل
- دخیل‌کردن تصمیم‌گیری برای شارژ منابع انرژی حسگرها به عنوان پارامتر جدید
- بررسی کارایی راهکار بر روی صورت مسئله‌های متفاوت برای مثال با دوره تکرار شرایط متفاوت محیطی (در مقاله پیش رو دوره تکرار شرایط محیطی که همان شرایط جوی است به صورت یک‌ساله در نظر گرفته شده است).

مراجع

[1] J. Luo, Y. Chen, M. Wu, and Y. Yang, "A survey of routing protocols for underwater wireless sensor networks," *IEEE Commun. Surv. Tutorials*, vol. 23, no. 1, pp. 137-160, Jan. 2021.

[2] R. Piyare, A. L. Murphy, C. Kiraly, P. Tosato, and D. Brunelli, "Ultra low power wake-up radios: a hardware and networking survey," *IEEE Communications Surveys and Tutorials*, vol. 19, no. 4, pp. 2117-2157, Fourthquarter 2017.

[3] D. S. Deif and Y. Gadallah, "An ant colony optimization approach for the deployment of reliable wireless sensor networks," *IEEE Access*, vol. 5, pp. 10744-10756, 2017.

[4] A. B. Noel, A. Abdaoui, T. Elfouly, M. H. Ahmed, A. Badawy, and M. S. Shehata, "Structural health monitoring using wireless sensor networks: a comprehensive survey," *IEEE Commun. Surv. Tutorials*, vol. 19, no. 3, pp. 1403-1423, Third quarter 2017.

[5] N. Jan, *et al.*, "A balanced energy-consuming and hole-alleviating algorithm for wireless sensor networks," *IEEE Access*, vol. 5, pp. 6134-6150, 2017.

[6] M. Aazam, S. Zeadally, and E. F. Flushing, "Task offloading in edge computing for machine learning-based smart healthcare," *Comput. Networks*, vol. 191, Article ID: 108019, 11 pp., May 2021.

[7] Y. Li, X. Zhang, and Q. Rong, "Optimization of hospital computer network and helicobacter pylori ulcer nursing analysis," *Microprocess. Microsyst.*, vol. 81, Article ID:. 103771, Mar. 2021.

[8] T. M. Behera and S. K. Mohapatra, "A novel scheme for mitigation of energy hole problem in wireless sensor network for military application," *Int. J. Commun. Syst.*, vol. 34, no. 11, Article ID: e4886, 25 Jul. 2021.

[9] B. R. Al-Kaseem, Z. K. Taha, S. W. Abdulmajeed, and H. S. Al-Raweshidy, "Optimized energy-efficient path planning strategy in WSN with multiple mobile sinks," *IEEE Access*, vol. 9, pp. 82833-82847, 2021.

[10] M. A. Khan, *et al.*, "Network lifetime maximization via energy hole alleviation in wireless sensor networks," in *Advances on Broad-Band Wireless Computing, Communication and Applications*, (eds.) M. A. Khan, *et al.*, pp. 279-290, Springer, 2017.

[11] G. Shi, K. Liu, and J. Zeng, "Cooperative depth rotation to avoid energy hole for 3D underwater sensor networks," in *Proc. IEEE 24th Int. Conf. Comput. Support. Coop. Work Des. CSCWD'21*, pp. 825-830, Dalian, China, 5-7 May 2021.

[12] G. S. Binu and B. Shajimohan, "A novel heuristic based energy efficient routing strategy in wireless sensor network," *Peer-to-Peer Netw. Appl.* vol. 13, no. 6, pp. 1853-1871, Jun. 2020.

[13] M. Abu Alsheikh, D. T. Hoang, D. Niyato, H. P. Tan, and S. Lin, "Markov decision processes with applications in wireless sensor networks: a survey," *IEEE Commun. Surv. Tutorials*, vol. 17, no. 3, pp. 1239-1267, Third Quarter 2015.

[14] T. M. Hansen, E. K. P. Chong, S. Suryanarayanan, A. A. Maciejewski, and H. J. Siegel, "A partially observable markov decision process approach to residential home energy management," *IEEE Trans. Smart Grid*, vol. 9, no. 2, pp. 1271-1281, Mar. 2018.

[15] H. Nigam, A. Karmakar, and A. K. Saini, "Wireless sensor network based structural health monitoring for multistory building," in *Proc. 4th Int. Conf. Comput. Commun. Signal Process, ICCCSP'20*, 5 pp., Chennai, India, 28,-29 Sept. 2020.

[16] S. Alamandala, R. L. N. Sai Prasad, and P. Rathish Kumar, "Cost-effective load measurement system for health monitoring using long-period grating as an edge filter," *Opt. Fiber Technol.*, vol. 59, Article ID: 102328, Oct. 2020.

[17] S. Dey, R. Bhattacharyya, S. E. Sarma, and N. C. Karmakar, "A novel 'smart skin' sensor for chipless RFID-based structural health monitoring applications," *IEEE Internet Things J.*, vol. 8, no. 5, pp. 3955-3971, Mar. 2021.

[18] X. Liu, J. Cao, and P. Guo, "SenetSHM: towards practical structural health monitoring using intelligent sensor networks," in Proc. IEEE Int. Confs. on Big Data and Cloud Computing, BDCloud'16, Social Computing and Networking, SocialCom'16 and Sustainable Computing and Communications, SustainCom'16, pp. 416-423, Atlanta, GA, USA, 8-10 Oct. 2016.

[19] E. Zaraket, N. M. Murad, S. S. Yazdani, L. Rajaoarisoa, and B. Ravelo, "An overview on low energy wake-up radio technology: active and passive circuits associated with MAC and routing protocols," *J. Netw. Comput. Appl.*, vol. 190, Article ID: 103140, Sept. 2021.

[20] M. Magno, V. Jelicic, B. Srbinovski, V. Bilas, E. Popovici, and L. Benini, "Design, implementation, and performance evaluation of a flexible low-latency nanowatt wake-up radio receiver," *IEEE Trans. Ind. Informatics*, vol. 12, no. 2, pp. 633-644, Apr. 2016.

[21] J. Oller, I. Demirkol, J. Casademont, J. Paradells, G. U. Gamm, and L. Reindl, "Has time come to switch from duty-cycled MAC protocols to wake-up radio for wireless sensor networks?," *IEEE/ACM Trans. Netw.*, vol. 24, no. 2, pp. 674-687, Apr. 2016.

[22] A. Fumtchum, F. Hutu, P. Tsafack, G. Villemaud, and E. Tanyi, "High efficiency rectifier for a quasi-passive wakeup radio," in *Proc. Int. Symp. Signals, Circuits Syst.*, *ISSCS'19,* 4 pp., Iasi, Romania, 11-12 Jul. 2019.

[23] S. B. Amsalu, W. K. Zegeye, D. Hailemariam, and Y. Astatke, "Design and performance evaluation of an energy efficient routing protocol for wireless sensor networks," in *Proc. 50th Annu. Conf. Inf. Syst. Sci, CISS'16,* pp. 48-53, Princeton, NJ, USA, 16-18 Mar. 2016.

[24] S. J. Marinkovic and E. M. Popovici, "Nano-power wireless wake-up receiver with serial peripheral interface," *IEEE J. Sel. Areas Commun.*, vol. 29, no. 8, pp. 1641-1647, Sep. 2011.

[25] M. Del Prete, D. Masotti, A. Costanzo, M. Magno, and L. Benini, "A dual-band wake-up radio for ultra-low power wireless sensor networks," in *Proc. IEEE Top. Conf. Wirel. Sensors Sens. Networks*, *WiSNet'16,* pp. 81-84, Austin, TX, USA, 24-27 Jan. 2016.

[26] G. Wittenburg, N. Dziengel, S. Adler, Z. Kasmi, M. Ziegert, and J. Schiller, "Cooperative event detection in wireless sensor networks," *IEEE Commun. Mag.*, vol. 50, no. 12, pp. 124-131, Dec. 2012.

[27] X. Li, H. Wang, Y. Yu, and C. Qian, "An IoT data communication framework for authenticity and integrity," in *Proc. of the 2nd Int. Conf. on Internet-of-Things Design and Implementation, IoTDI'17,* pp. 159-170, Pittsburgh, PA, USA, 18-21 Apr 2017.

[28] F. Al-Quayed, A. Soudani, and S. Al-Ahmadi, "Lightweight feature extraction method for efficient acoustic-based animal recognition in wireless acoustic sensor networks," *EURASIP J. Wirel. Commun. Netw.*, vol. 2020, Article ID: 256, 21 pp., 14 Dec. 2020.

[29] C. Titouna, M. Aliouat, and M. Gueroui, "FDS: fault detection scheme for wireless sensor networks," *Wirel. Pers. Commun.*, vol. 86, no. 2, pp. 549-562, Aug. 2015.

[30] L. Gu, *et al.*, "Lightweight detection and classification for wireless sensor networks in realistic environments," in *Proc. of the 3rd Int. Conf. on Embedded Networked Sensor Systems*, *SenSys'05*, pp. 205-217, San Diego, CA, USA, 2-4 Nov. 2005.

[31] L. Feng, C. XiaoDong, W. Youying, S. Huazhong, and Z. Haijing, "Research on wireless ad hoc network technology for building

www.SID.ir

Archive of SID

monitoring," *J. Phys. Conf. Ser.*, vol. 1684, no. 1, Article ID: 012048, Nov. 2020.

[32] J. Chen, K. H. Low, Y. Yao, and P. Jaillet, "Gaussian process decentralized data fusion and active sensing for spatiotemporal traffic modeling and prediction in mobility-on-demand systems," *IEEE Trans. Autom. Sci. Eng.*, vol. 12, no. 3, pp. 901-921, Jul. 2015.

[33] H. Baali, H. Djelouat, A. Amira, and F. Bensaali, "Empowering technology enabled care using IoT and smart devices: a review," *IEEE Sens. J.*, vol. 18, no. 5, pp. 1790-1809, Mar. 2018.

[34] W. Dong, C. Chen, X. Liu, and J. Bu, "Providing OS support for wireless sensor networks: challenges and approaches," *IEEE Commun. Surv. Tutorials*, vol. 12, no. 4, pp. 519-530, Fourth Quarter 2010.

[35] M. Amjad, M. Sharif, M. K. Afzal, and S. W. Kim, "TinyOS-new trends, comparative views, and supported sensing applications: a review," *IEEE Sens. J.*, vol. 16, no. 9, pp. 2865-2889, May 2016.

[36] B. Li and W. Dong, "Edgeprog: edge-centric programming for IoT applications," in *Proc.-Int. Conf. Distrib. Comput. Syst.*, pp. 212-222, Wuyishan, China, 11-13 Nov. 2020.

[37] L. Gu and J. A. Stankovic, "*t*-kernel: providing reliable OS support to wireless sensor networks," in *Proc. 4th Int. Conf. Embed. Networked Sens. Syst.-SenSys'06*, pp. 1-14, Boulder, CO, USA, 31 Oct.-3 Nov. 2006.

[38] A. Dunkels, N. Finne, J. Eriksson, and T. Voigt, "Run-time dynamic linking for reprogramming wireless sensor networks," in *Proc. 4th Int. Conf. Embed. Networked Sens. Syst.-SenSys'06*, pp. 15-28, Boulder, CO, USA, 31 Oct.-3 Nov. 2006..

[39] I. Khan, F. Belqasmi, R. Glitho, N. Crespi, M. Morrow, and P. Polakos, "Wireless sensor network virtualization: a survey," *IEEE Commun. Surv. Tutorials*, vol. 18, no. 1, pp. 553-576, Jan. 2016.

[40] D. Gay, *et al*., "The nesC language: a holistic approach to networked embedded systems," *ACM Sigplan Not.*, vol. 38, no. 5, pp. 1-11, May 2003.

[41] Q. Cao, T. Abdelzaher, J. Stankovic, and T. He, "The LiteOS operating system: towards unix-like abstractions for wireless sensor networks," in *Proc. Int. Conf. on Information Processing in Sensor Networks*, pp. 233-244, St. Louis, MO, USA, 22-24 Apr. 2008.

[42] P. Levis, "Experiences from a decade of TinyOS development," in *Proc. 10th of the 10th USENIX Conf. on Operating Systems Design and Implementation. OSDI'12*, pp. 207-220, Hollywood ,CA USA, 8-10 Oct. 2012.

[43] E. Baccelli, O. Hahm, M. Gunes, M. Wahlisch, and T. Schmidt, "RIOT OS: towards an OS for the Internet of Things," in *Proc. IEEE Conf. on Computer Communications Workshops*, pp. 79-80, Turin, Italy, 14-19 Apr 2014.

[44] M. Z. A. Bhuiyan, G. Wang, J. Cao, and J. Wu, "Deploying wireless sensor networks with fault-tolerance for structural health monitoring," *IEEE Trans. Comput.*, vol. 64, no. 2, pp. 382-395, Feb. 2015.

[45] Y. Liu, T. Voigt, N. Wirstrom, and J. Hoglund, "EcoVibe: on-demand sensing for railway bridge structural health monitoring," *IEEE Internet Things J.*, vol. 6, no. 1, pp. 1068-1078, Feb. 2019.

[46] M. A. Maisto, G. Leone, A. Brancaccio, and R. Solimene, "Efficient planar near-field measurements for radiation pattern evaluation by a warping strategy," *IEEE Access*, vol. 9, pp. 62255-62265, 2021.

[47] X. Chen, G. Wang, and K. C. Ho, "Semidefinite relaxation method for unified near-field and far-field localization by AOA," *Signal Processing*, vol. 181pp. 107916-Apr. 2021.

[48] N. T. Hanh, H. T. T. Binh, N. Van Son, and M. Kim, "Minimal relay node placement for ensuring network connectivity in mobile wireless sensor networks," *IEEE 19th Int. Symp. Netw. Comput. Appl. NCA'20*, 8 pp., Cambridge, MA, USA, 24-27Nov. 2020.

[49] W. Doghri, A. Saddoud, and L. C. Fourati, "Cyber-physical systems for structural health monitoring: sensing technologies and intelligent computing," *J. Supercomput.*, pp. 1-44, Jun. 2021.

[50] S. Kim, *et al.*, "Health monitoring of civil infrastructures using wireless sensor networks," in *Proc. of the 6th Int. Conf. on Information Processing in Sensor Networks*, *IPSN'07*, pp. 254-263, Cambridge, MA, USA, 25-27 Apr. 2007.

[51] Y. Tselishchev and A. Boulis, "Wireless sensor network tesbed for structural health monitoring of bridges," in *Proc. of the IEEE 36th Conf. on Local Computer Networks*, pp. 1040-1043, Bonn, Germany, 4-7 Oct. 2011.

[52] D. Phanish, *et al.*, "A wireless sensor network for monitoring the structural health of a football stadium," in *Proc. of the IEEE 2nd World Forum on Internet of Things, WF-IoT'15*, pp. 471-477, Milan, Italy, 14-16 Dec. 2015.

[53] M. K. Wittmann, *et al.*, "Predictive decision making driven by multiple time-linked reward representations in the anterior cingulate cortex," *Nat. Commun.*, vol. 6, Article ID: 12327, 2016.

[54] S. Misra, S. D. Hong, G. Xue, and J. Tang, "Constrained relay node placement in wireless sensor networks: formulation and approximations," *IEEE/ACM Trans. Netw.*, vol. 18, no. 2, pp. 434-447, Apr. 2010.

[55] J. Ranieri, A. Chebira, and M. Vetterli, "Near-optimal sensor placement for linear inverse problems," *IEEE Trans. Signal Process.*, vol. 62, no. 5, pp. 1135-1146, 1 Mar. 2014.

[56] W. Zhang, Q. Yin, H. Chen, F. Gao, and N. Ansari, "Distributed angle estimation for localization in wireless sensor networks," *IEEE Trans. Wirel. Commun.*, vol. 12, no. 2, pp. 527-537, Feb. 2013.

[57] J. Yang and Z. Peng, "Beetle-swarm evolution competitive algorithm for bridge sensor optimal placement in SHM," *IEEE Sens. J.*, vol. 20, no. 15, pp. 8244- 8255, 1 Aug. 2019.

[58] M. Mezzavilla, S. Goyal, S. Panwar, S. Rangan, and M. Zorzi, "An MDP model for optimal handover decisions in mmWave cellular networks," in *Proc. European Conf. on Networks and Communications, EuCNC'16,* pp. 100-105, Athens, Greece, 27-30 Jun. 2016.

[59] M. Abdulkarem, K. Samsudin, F. Z. Rokhani, and M. F. A. Rasid, "Wireless sensor network for structural health monitoring: a contemporary review of technologies, challenges, and future direction" *Structural Health Monitoring*, vol. 19, no. 3, pp. 693-735, Jul. 2019.

[60] A. Biason and M. Zorzi, "Battery-powered devices in WPCNs," *IEEE Trans. Commun.*, vol. 65, no. 1, pp. 216-229, Jan. 2017.

[61] M. Frei, C. Deb, R. Stadler, Z. Nagy, and A. Schlueter, "Wireless sensor network for estimating building performance," *Autom. Constr.*, vol. 111, Article ID: 103043, Mar. 2020.

[62] A. Arulmurugan and A. Amuthan, "Markov modulated bernoulli prediction process-based cluster head selection mechanism for improving resilience in wireless sensor networks," *Int. J. Commun. Syst.*, vol. 34, no. 8, Article ID: e4771, May 2021.

[63] L. Muduli, P. K. Jana, and D. P. Mishra, "Wireless sensor network based fire monitoring in underground coal mines: a fuzzy logic approach," *Process Saf. Environ. Prot.*, vol. 113, pp. 435-447, Jan. 2018.

[64] D. Catenazzo, B. Orflynn, and M. Walsh, "On the use of wireless sensor networks in preventative maintenance for industry 4.0," in *Proc. Int. Conf. Sens. Technol. ICST'19*, pp. 256-262, Limerick, Ireland, 4-6 Jan. 2019.

[65] M. E. Haque, *et al*., "Comparative study of IoT-based topology maintenance protocol in a wireless sensor network for structural health monitoring," *Remote Sens.*, vol. 12, no. 15, Article ID: 2358-, Jul. 2020.

سیدسهند نقیب هاشمی تحصیلات خود را در مقطع کارشناسی مهندسی نرم افزار در سال ۱۳۹۵ از دانشگاه زنجان و در مقطع کارشناسی ارشد معماری کامپیوتر در سال ۱۳۹۹ از دانشگاه خوارزمی تهران به پایان رسانده است. وی از از سال ۱۳۹۲ به‌عنوان مهندس نرم‌افزار و تحلیلگر داده در بخش خصوصی فعال بوده و از سال ۱۳۹۴ تاکنون فعالیت‌های تحقیقاتی متنوعی در حوزه معماری سیستم‌های کامپیوتری و هوش مصنوعی داشته است. وی اینک به عنوان مدیر ارشد فنی با معاونت علمی و فناوری ریاست جمهوری در حال همکاری می‌باشد. زمینه‌های تحقیقاتی مورد علاقه ایشان عبارتند از: تحمل‌پذیری اشکال در سیستم‌های کامپیوتری، شبکه‌های حسگر بی‌سیم، سیستم‌های چند عاملی، سیستم‌های پایشی و نظارتی.

سیدامیر اصغری توچائی تحصیلات خود را در مقاطع کارشناسی گرایش مهندسی سخت‌افزار در سال ۱۳۸۶ از دانشگاه صنعتی امیرکبیر و در مقاطع کارشناسی ارشد و دکتری گرایش معماری کامپیوتر به‌ترتیب در سال‌های ۱۳۸۸ و ۱۳۹۲ از دانشگاه صنعتی امیرکبیر به پایان رسانده است. وی هم‌اکنون عضو هیأت علمی در گروه مهندسی برق و کامپیوتر دانشگاه خوارزمی می‌باشد. زمینه‌های تحقیقاتی مورد علاقه ایشان عبارتند از: طراحی سیستم‌های تحمل‌پذیر اشکال و طراحی سیستم‌های نهفته بی‌درنگ.

محمدرضا بینش مروستی مدرک کارشناسی ارشد خود را در سال ۱۳۸۶ از گروه مهندسی برق و کامپیوتر دانشگاه تهران اخذ نموده و تحصیلات خود را در مقطع دکتری در گروه مهندسی برق و کامپیوتر دانشگاه مک مستر کانادا در سال ۱۳۹۲ به اتمام رسانده است. وی هم‌اکنون عضو هیأت علمی در گروه مهندسی برق و کامپیوتر دانشگاه خوارزمی می‌باشد. زمینه‌های تحقیقاتی مورد علاقه ایشان عبارتند از: معماری کامپیوتر، طراحی سیستم‌های دیجیتال کم مصرف، FPGA، محاسبات تقریبی،شبکه درون تراشه‌ای.

www.SID.ir