



بیشینه‌سازی طول عمر شبکه‌های حسگر صوتی زیرآبی با جایگذاری بهینه گره‌های رله

زهرا محمدی* محدثه سلیمان پورمقدم** داریوش عباسی مقدم*** سیامک طالبی****

* کارشناس ارشد - گروه مهندسی برق - دانشگاه شهید باهنر کرمان

** استادیار - گروه مهندسی مکانیک - مجتمع آموزش عالی بم

*** دانشیار - گروه مهندسی برق - دانشگاه شهید باهنر کرمان

**** استاد - گروه مهندسی برق - دانشگاه شهید باهنر کرمان

تاریخ دریافت: ۱۳۹۹/۰۱/۲۵ تاریخ پذیرش: ۱۳۹۹/۰۹/۰۶

نوع مقاله: پژوهشی

چکیده

شبکه‌های حسگر صوتی زیرآبی به دلیل ویژگی‌های مطلوب خود و کاربردهای عملی گسترده در زمینه‌های ارتباطی مختلف، توجه زیادی را به خود جلب کرده‌اند. از آنجا که گره‌های حسگر زیرآبی دارای هزینه‌ی بالا و پیچیدگی جایگذاری هستند، افزایش طول عمر این شبکه‌ها از اهمیت زیادی برخوردار است. گره‌های رله نقش مهمی در کاهش فاصله مخابراتی و انرژی مصرفی دارند. اما، مسئله مهم قرارگیری بهره‌ور گره‌های رله اطراف گره‌های بحرانی شبکه به منظور جلوگیری از حذف آن‌ها و در نتیجه افزایش طول عمر شبکه است. برای این منظور، در این مقاله روشی جدید به نام جایگذاری بهره‌ور گره رله (ERS) معرفی شده است که شامل فرمول‌بندی کردن مکان هر گره رله به صورت یک مسئله بهینه‌سازی غیرمحدب است. در حقیقت، وجود قیود تفاضل محدب منجر به غیرمحدب شدن مسئله بهینه‌سازی پیشنهادی می‌شود و دستیابی به جواب بهینه را دشوار می‌سازد. از این‌رو، در گام بعد با پیشنهاد یک تبدیل جدید، مسئله مذکور به معادل محدب خود تبدیل می‌شود. مهم‌ترین مزیت مسئله برنامه‌ریزی محدب، قابلیت دستیابی به جواب بهینه مسئله است. نتایج شبیه‌سازی نشان‌دهنده برتری عملکرد روش پیشنهادی در طول عمر و بهره‌وری نسبت به روش ابتکاری پیشین تنظیم گره رله (RA) است.

واژگان کلیدی: شبکه‌های حسگر صوتی زیرآبی، گره‌های رله، طول عمر شبکه، مخابرات چندپرسی، برنامه‌ریزی محدب.

شده است [۱]. شبکه‌های حسگر صوتی زیرآبی در مواردی مانند

نظارت بر آلودگی، نظارت بر استخراج نفت و نظارت بر آبی‌پروری

به کار برده می‌شوند، از این‌رو، اخیراً بسیار مورد توجه قرار گرفته‌اند

[۲، ۳]. از جمله کاربردهای دیگر این شبکه‌ها می‌توان به اخطار

سونامی، پیدا کردن لاشه کشتی، کاربردهای نظامی و امنیتی،

۱. مقدمه

بخش اعظم سطح کره زمین با آب پوشیده شده است و کنترل آن

حائز اهمیت است. با پیشرفت سریع فناوری شبکه‌های حسگر بی-

سیم، انگیزه‌ای برای گسترش شبکه‌های حسگر صوتی زیرآبی ایجاد

^۱ نویسنده مسئول: سیامک طالبی siamak.talebi@uk.ac.ir

آن‌ها در محیط زیرآبی به صورت تنک^۳ انجام می‌شود [۵]. جایگذاری تنک گره‌های حسگر زیرآبی منجر به طولانی شدن فاصله‌ی مخابره^۴ بین آن‌ها و در نتیجه افزایش انرژی مصرفی گره‌های حسگر می‌شود. از آن‌جا که گره‌های حسگر با توجه به الزامات پوشش^۵ و اتصال^۶ شبکه در منطقه هدف پراکنده می‌شوند، کاهش فاصله بین آن‌ها به منظور کاهش انرژی مصرفی عملی نیست. از این‌رو در [۷، ۸]، بکارگیری گره‌های رله بزرگ و پر قدرت^۷ به منظور کاهش فاصله مخابراتی بررسی شده است. این گره‌ها دارای انرژی بیش‌تر و اندازه بزرگ‌تر نسبت به گره‌های حسگر هستند و به عنوان گره‌های مسیریاب^۸ جهت ارسال اطلاعات گره‌های حسگر به سمت ایستگاه پایه عمل می‌کنند. عیب بزرگ این گره‌ها اندازه بزرگ آن‌ها است که در نتیجه به آسانی توسط دشمن قابل شناسایی هستند. بنابراین بکارگیری گره‌های رله کوچک^۹ که دارای اندازه و انرژی یکسان با گره‌های حسگر هستند از لحاظ عملی مناسب‌تر است [۹].

در این مقاله جایگذاری گره‌های رله کوچک در شبکه حسگر صوتی زیرآبی سه‌بعدی در نظر گرفته شده است. در حقیقت، از مشارکت گره‌های رله جهت بهبود حفره انرژی و افزایش طول عمر شبکه حسگر زیرآبی استفاده شده است. علاوه بر آن، استفاده بهینه از انرژی گره‌های رله مسئله‌ای است که در این تحقیق به آن پرداخته شده است. در ادامه، به دسته‌بندی مطالعات صورت گرفته در حوزه افزایش طول عمر شبکه حسگر صوتی زیرآبی پرداخته می‌شود. عده‌ای از محققین روی طراحی پروتکل مسیریابی برای متعادل کردن مصرف انرژی بین گره‌های حسگر متمرکز شده‌اند. برای مثال، در [۱۰، ۱۱] به منظور افزایش طول عمر شبکه حسگر زیرآبی، فاصله بین گره‌های حسگر و انرژی باقی‌مانده^{۱۰} هر کدام به عنوان معیار برای انتخاب گره‌های ارسال‌کننده به کار رفته است. دو پروتکل مسیریابی در [۱۲] ارائه شده است، بر مبنای اولین روش پیشنهادی هر گره طبق انرژی باقی‌مانده خود به صورت تک یا چندپرسی با دیگر گره‌ها به مخابره اطلاعات می‌پردازد. هم‌چنین،

اکتشاف منابع زیرآبی و غیره اشاره کرد. گره‌های حسگر موجود در این شبکه‌ها توانایی مشاهده محیط اطراف، جمع‌آوری اطلاعات از محیط، پردازش اندک اطلاعات جمع‌آوری شده و ارسال آن‌ها را دارند. هر کدام از این اعمال باعث صرف انرژی می‌شود، البته اکثر انرژی در انتقال اطلاعات از دست می‌رود [۴].

از آن‌جا که انرژی مصرفی گره‌های حسگر از طریق یک باتری با انرژی محدود تامین می‌شود، این باتری‌ها پس از مدتی تخلیه می‌شوند. با توجه به طبیعت محیط زیرآبی، امکان شارژ دوباره یا عوض کردن باتری گره‌های حسگر زیرآبی وجود ندارد. بنابراین، اتمام انرژی گره‌ها علاوه بر ناکارآمدی آن‌ها در نظارت بر محیط اطراف، منجر به عدم توانایی آن‌ها در ارسال اطلاعات سایر گره‌های حسگر در مخابرات چندپرسی^۱ می‌شود. از سویی دیگر، هزینه‌ی گره‌های حسگر زیرآبی در مقایسه با گره‌های حسگر زمینی بسیار بالا است و در نتیجه افزایش مدت کارکرد این گره‌ها مسئله‌ای مهم است [۵].

ساخت یک شبکه حسگر زیرآبی چندپرسی در یک منطقه بزرگ چندین چالش را به دنبال دارد. برای مثال، گره‌های حسگر نزدیک به ایستگاه پایه علاوه بر ارسال اطلاعات خود به سمت ایستگاه پایه مسئول ارسال اطلاعات بقیه گره‌های حسگر هستند که موجب اتمام سریع‌تر انرژی آن‌ها نسبت به سایر گره‌های حسگر می‌شود. نویسندگان در [۶] ثابت کرده‌اند زمانی که گره‌های نزدیک به ایستگاه پایه تمام انرژی خود را از دست داده‌اند، سایر گره‌ها ۹۳٪ انرژی خود را حفظ کرده‌اند. این مسئله باعث ایجاد حفره انرژی^۲ در شبکه و در نتیجه جزءبندی شدن شبکه می‌شود. در حقیقت، در یک شبکه جزءبندی شده بعضی از گره‌های حسگر با وجود داشتن انرژی توانایی ارسال اطلاعات خود را به سمت ایستگاه پایه ندارند و در نتیجه طول عمر شبکه به پایان می‌رسد.

همان‌گونه که پیش از این بیان شد، هزینه‌ی گره‌های حسگر زیرآبی در مقایسه با هم‌تای زمینی آن‌ها بالاتر است، از این‌رو جایگذاری

^۱ Multi-hop communication

^۲ Energy hole

^۳ Sparse

^۴ Transmission distance

^۵ Coverage

^۶ Connectivity

^۷ Macro relay nodes

^۸ Router nodes

^۹ Micro relay nodes

^{۱۰} Residual energy

[۱۹] به منظور کاهش انرژی مصرفی از حرکت گره رله بین دو گره در حال مخابره استفاده شده است. پس از پایان روند مخابره گره‌ها، گره رله به مکان اولیه خود بازمی‌گردد. همچنین به منظور جایگذاری گره‌های رله در شبکه حسگر سه‌بعدی در [۲۰] یک روش ابتکاری به نام تنظیم گره رله^۵ (RA) پیشنهاد شده است. طبق روش پیشنهادی ابتکاری RA، گره‌های رله با توجه به یک تابع چگالی در مکان‌های مختلف شبکه قرار می‌گیرند. بدین صورت که در مناطق با انرژی مصرفی بالاتر، تعداد بیش‌تری گره رله قرار می‌گیرد. اما در این روش مکان گره‌های رله در دو گام به دست می‌آید به گونه‌ای که ابتدا مکان آن‌ها روی سطح آب به صورت تصادفی تعیین می‌شود و سپس عمق آن‌ها تنظیم می‌شود. این نوع روش‌های جایگذاری ابتکاری دست‌یابی به مکان شبه‌بهینه را به دنبال دارد که باعث اتلاف منابع موجود می‌شود.

از سویی دیگر، برخی از نویسندگان با تعریف مسئله بهینه‌سازی ریاضی به جایگذاری گره رله در شبکه پرداخته‌اند [۲۱، ۲۲]. به عنوان مثال، روش پیشنهادی در [۲۲] شامل یک مسئله بهینه‌سازی غیر محدب است. مسائل بهینه‌سازی غیر محدب دارای چندین نقطه بهینه محلی هستند و جواب مسئله به نقطه اولیه روش‌های تکرار بستگی دارد، از این‌رو پیدا کردن نقطه بهینه سراسری دشوار و گاه غیر ممکن است [۲۳]. این عوامل منجر به زمان‌بر شدن و در نتیجه ناکارآمدی روش مطرح شده در [۲۲] می‌گردد. به علاوه، نویسندگان در [۲۱] ابتدا با در نظر گرفتن چیدمان دایروی برای قرارگیری گره‌های حسگر، جایگذاری گره رله را به صورت هم‌زمان با گره‌های حسگر مورد مطالعه قرار داده‌اند. با در نظر گرفتن این فرضیات و مدل سیستم، جایگذاری گره رله به صورت یک مسئله بهینه‌سازی دو هدفه^۶ شامل دو هدف متضاد فرمول‌بندی شده است. به منظور تبدیل مسئله دو هدفه به مسئله تک هدفه از روش مجموع وزنی^۷ استفاده شده است و در نهایت الگوریتم تفاضل محدب^۸ برای حل آن به کار رفته است. در این مقاله، با پیروی از [۲۰] حالت کلی‌تر و عملی‌تری از جایگذاری گره‌های حسگر

نویسندگان در پروتکل پیشنهادی دوم، با تخصیص انرژی بیش‌تر به گره‌هایی که مسئول حمل بار بیش‌تری در شبکه هستند سعی در رفع مسئله حفره انرژی در شبکه داشته‌اند.

به هر حال، از آن‌جا که محیط زیرآبی غیر قابل پیش‌بینی است، طراحی یک پروتکل مسیریابی مناسب نیازمند پیچیدگی محاسباتی بالا است [۱۳]. از این‌رو برخی رویکردهای کاهش مصرف انرژی حول نحوه جمع‌آوری اطلاعات از گره‌های حسگر توسعه یافته‌اند. به عنوان مثال، در [۱۴، ۱۵] جمع‌آوری داده مبتنی بر خوشه‌بندی^۱ ارائه شده است، در این روش‌ها کل گره‌های حسگر به تعدادی خوشه تقسیم می‌شوند و در هر خوشه یک گره به عنوان سرخوشه^۲ انتخاب می‌شود. پس از آن سرخوشه‌ها مسئول ارسال اطلاعات سایر گره‌های حسگر به سمت ایستگاه پایه می‌شوند. لازم به ذکر است در [۱۴] بعد از انتخاب سرخوشه‌ها، هر خوشه به زیرخوشه‌هایی تقسیم می‌شود. در هر کدام از زیرخوشه‌ها یک گره به عنوان گره نماینده، مسئول جمع‌آوری داده از دیگر گره‌ها می‌شود. همچنین در [۱۵] انرژی باقی‌مانده و مکان گره‌های حسگر به منظور انتخاب بهینه سرخوشه‌ها در نظر گرفته شده است.

در شبکه‌های حسگر صوتی زیر آبی خطای ارسال تحت پیوندهای صوتی طولانی غیر قابل اجتناب است، از این‌رو، در سال‌های اخیر بحث کاهش احتمال خطا مورد توجه برخی از محققین قرار گرفته است. به منظور افزایش قابلیت اطمینان، ابتدایی‌ترین روش درخواست بازفرستی خودکار^۳ است [۱۶]. اما از آن‌جا که این روش بر پایه ارسال دوباره اطلاعات هست، موجب توان مصرفی بالا در شبکه می‌شود. به همین منظور، نویسندگان در [۱۷، ۱۸] به بررسی روش تصحیح خطای رو به جلو^۴ به منظور افزایش طول عمر شبکه حسگر زیر آبی پرداخته‌اند. لازم به ذکر است که در روش تصحیح خطای رو به جلو مسئله بهینگی انرژی با بازفرستی‌های بسیار کم قابل حل هست.

توجه به مسئله جایگذاری گره رله به منظور افزایش طول عمر شبکه حسگر صوتی زیرآبی در [۱۹-۲۲] بررسی شده است. در

^۱Clustering^۲Cluster head^۳ Automatic Repeat reQuest (ARQ)^۴ Forward Error Correction^۵ Relay node Adjustment^۶ Bi-objective optimization problem^۷ Weighted sum method (WSM)^۸ Difference Convex Algorithm

بیشینه‌سازی محدب برابری بهینه محلی^۳ و بهینه سراسری^۴ آن‌ها است، الگوریتم‌هایی که برای حل این مسائل توسعه یافته‌اند از این ویژگی استفاده می‌کنند و بسیار سریع و کارا به جواب بهینه دست می‌یابند.

۳. به منظور ارزیابی عملکرد روش پیشنهادی، به بررسی پیچیدگی زمانی و مقایسه طول عمر (از طریق آزمایشات شبیه‌سازی) با روش RA موجود در [۲۰] پرداخته شده است. طبق بررسی انجام شده، پیچیدگی روش پیشنهادی همانند روش RA و طبق آزمایشات شبیه‌سازی عملکردی بالاتر از آن دارد.

ادامه این مقاله به صورت زیر سازمان‌دهی شده است:

در بخش دوم، مدل سیستم ارائه می‌شود. روش پیشنهادی جای‌گذاری گره رله و مدل معادل محدب آن در بخش سوم به طور مفصل شرح داده می‌شود. در بخش چهارم، به صورت تحلیلی به بررسی بهره‌وری روش پیشنهادی در برابر تغییرات محیط زیر آبی پرداخته می‌شود. بررسی پیچیدگی روش پیشنهادی و پس از آن نتایج ارزیابی روش پیشنهادی در بخش پنجم ارائه و تحلیل خواهند شد. در نهایت در بخش ششم، به جمع‌بندی این تحقیق پرداخته خواهد شد.

۲. مدل سیستم

در این بخش به تشریح کامل شبکه حسگر صوتی زیرآبی سه‌بعدی پرداخته می‌شود. برای این منظور، ابتدا مدل سیستم و انرژی مصرفی مشخص می‌شوند، پس از آن تعریف طول عمر شبکه حسگر صوتی ارائه می‌شود. در انتهای بخش، به شرح فرضیات مورد استفاده در تحقیق پرداخته خواهد شد.

شبکه حسگر صوتی زیرآبی، سه‌بعدی و عمق محیط زیرآبی H در نظر گرفته می‌شود. منطقه هدف به صورت استوانه نشان داده شده در شکل ۱ مدل می‌شود. شبکه دارای سه نوع گره شامل: گره حسگر، گره رله و ایستگاه پایه است. گره‌های حسگر مسئول نظارت بر محیط اطراف و جمع‌آوری اطلاعات از آن هستند و هر یک مجهز به فرستنده/گیرنده صوتی برای مخابرات تحت کانال زیرآبی هستند. اطلاعاتی که توسط هر گره حسگر جمع‌آوری می‌شود، باید به

(جایگذاری تصادفی) در نظر گرفته شده است. هدف اصلی، طراحی یک روش جایگذاری رله بر اساس مسائل بهینه‌سازی محدب است. در حقیقت، به دلیل برابر بودن جواب بهینه محلی با بهینه سراسری در مسائل بهینه‌سازی محدب، دستیابی به جواب بهینه بسیار سریع‌تر است. اما در عمل، بسیاری از مسائل به فرم غیر محدب هستند. در مواجهه با این نوع مسائل، بهترین راه‌حل در صورت امکان تبدیل مسئله غیر محدب به همتای محدب آن است و در غیر این صورت به دست آوردن جواب تقریبی مسئله از طریق تقریب محدب مسئله مورد توجه قرار گرفته است [۲۴].

۱-۱ نوآوری و سازمان‌دهی تحقیق

به طور کلی نوآوری مقاله به صورت زیر خلاصه می‌گردد:

۱. با توجه به نقش مهم گره‌های رله در افزایش طول عمر شبکه و به منظور غلبه بر چالش‌های موجود در روش‌های جایگذاری ابتکاری، هدف اصلی این مقاله به دست آوردن مکان بهینه گره‌های رله در شبکه‌های حسگر صوتی زیرآبی است. جهت حصول به این هدف، در ابتدا با پیشنهاد الگوریتم «جایگذاری بهره‌ور گره رله (ERS)» مسئله جایگذاری گره رله به صورت یک مسئله بهینه‌سازی ریاضی فرمول‌بندی می‌شود. نکته حائز اهمیت، اعمال قید عملی به مسئله طرح شده است که قابلیت جایگذاری هم‌زمان و غیرهم‌زمان گره‌های رله با گره‌های حسگر را به دنبال دارد. به بیانی بهتر، طبق روش پیشنهادی نه تنها حداکثر اتصال گره بحرانی با هم‌سایگان عمق پایین‌تر آن تضمین می‌شود بلکه انرژی گره رله تا حد امکان ذخیره می‌گردد. قید مذکور به صورت یک قید خطی (با پیچیدگی پایین) به مسئله اضافه می‌شود.

۲. با توجه به طبیعت غیرمحدب^۲ مسئله طرح شده، دستیابی به مکان بهینه گره‌های رله چالش‌برانگیز است. طبق مطالعات صورت گرفته، در کارهای پیشین به بررسی بهینه جایگذاری گره‌های رله پرداخته نشده است. از این رو، در گام بعد با پیشنهاد یک تبدیل جدید مسئله پیشنهادی به معادل محدب خود تبدیل می‌شود. ویژگی مهم مسائل

^۱ Efficient Relay node Setting

^۲ Non-convex

^۳ Local optimum

^۴ Global optimum

انرژی مصرفی یک گره را مشخص می‌کند. انرژی مصرفی از سالی بین دو گره تابعی از فاصله بین دو گره، نرخ اطلاعات و هم‌چنین ویژگی‌های محیطی است [۱۵]. به طور کلی مقدار انرژی که صرف ارسال یک بیت اطلاعات از گره i به سمت گره j می‌شود، با نماد p_{ij} مشخص می‌شود و از رابطه زیر قابل محاسبه است [۱۵، ۲۰]:

$$p_{ij} = \begin{cases} p_s + e_{fs}d_{ij} & d_{ij} < d_t \\ p_s + e_{mp}d_{ij} & d_{ij} \geq d_t \end{cases} \quad (2)$$

در رابطه فوق، p_s انرژی مصرفی برای پردازش یک بیت اطلاعات جهت ارسال است، e_{fs} و e_{mp} به ترتیب نشان‌دهنده ضریب تقویت‌کننده ارسال در مدل فضای آزاد و چندمسیری هستند، هم‌چنین، d_t یک فاصله آستانه است. به طور خاص در رابطه با کانال زیرآبی، ضریب تقویت‌کننده برای هر دو مدل $a^{d_{ij}}$ است [۱۵، ۲۰]، به طوری که a ضریب جذب در محیط زیرآبی است. در نتیجه، معادله مصرف انرژی برای ارسال یک بیت اطلاعات از گره i به سمت گره j به صورت زیر بازنویسی می‌شود:

$$p_{ij} = \begin{cases} p_s + a^{d_{ij}}d_{ij} & d_{ij} < d_t \\ p_s + a^{d_{ij}}d_{ij} & d_{ij} \geq d_t \end{cases} \quad (3)$$

ضریب جذب به فرکانس سیگنال صوتی (f) ربط دارد و برای فرکانس‌های بالاتر از یک کیلوهرتز بر حسب dB/km از طریق رابطه زیر محاسبه می‌شود [۲۵]:

$$10 \log \alpha = 0.1 \frac{f^2}{1+f^2} + \frac{4.0f^2}{4100+f^2} + 2.75 \times 10^{-4} f^2 + 0.003 \quad (4)$$

لازم به ذکر است، این ضریب برای فرکانس‌های پایین‌تر از یک کیلوهرتز به صورت زیر قابل بیان است:

$$10 \log \alpha = 0.02 + 0.1 \frac{f^2}{1+f^2} + 0.11f^2 \quad (5)$$

در ادامه تعریف طول عمر شبکه حسگر صوتی زیرآبی ارائه می‌شود.

۲-۲- طول عمر شبکه

تعاریف متعددی برای طول عمر شبکه‌های حسگر صوتی زیرآبی وجود دارد، از جمله نویسندگان در [۱۳، ۲۰، ۲۶] طول عمر شبکه را مدت زمان اتمام طول عمر اولین گره، تعریف کرده‌اند. در [۲۷] دوره زمانی اتمام طول عمر همه گره‌های شبکه را به عنوان طول عمر شبکه در نظر گرفته‌اند. برخی دیگر آن را مدت زمان پایان طول عمر بخش مشخصی از گره‌ها در نظر گرفته‌اند. با توجه به این که یک مخابره تا زمانی موثر و متعادل است که همه گره‌ها در

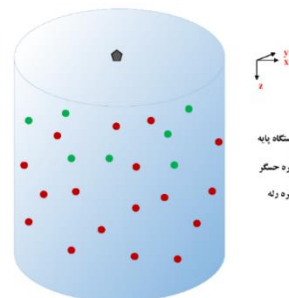
ایستگاه پایه‌ی روی سطح آب برسد. هر گره حسگر علاوه بر جمع‌آوری اطلاعات از محیط اطراف، توانایی رله کردن اطلاعات سایر گره‌های حسگر را دارد، در حقیقت اطلاعات گره حسگری که در فاصله زیاد از ایستگاه پایه قرار دارد با چندین پرش به آن می‌رسد. مکان گره‌های حسگر در منطقه هدف به صورت تصادفی و مجموعه آن‌ها با K مشخص می‌شود.

گره‌های رله به عنوان گره‌های مسیریاب بین گره‌های حسگر عمل می‌کنند، مجموعه این گره‌ها با R مشخص می‌شود و هر یک مجهز به فرستنده/گیرنده صوتی برای مخابرات زیرآبی هستند. برخلاف گره‌های حسگر که مکان آن‌ها به صورت تصادفی تعیین می‌شود، مکان گره‌های رله به صورتی دقیق برای بهبود عملکرد شبکه تعیین می‌شود. در این مقاله، گره‌های رله به منظور افزایش طول عمر شبکه به آن اضافه می‌شوند. شایان ذکر است که از دیدگاه عملی، ابتدا مکان گره‌های رله روی سطح آب ثابت می‌شود و سپس با استفاده از سیستم تنظیم عمق^۱، عمق آن‌ها معین می‌گردد [۲۹].

هر دو نوع گره حسگر و رله دارای انرژی اولیه E_p و برد مخابراتی RT هستند، d_{ij} بیان‌گر فاصله اقلیدسی بین دو گره i و j است و به صورت زیر محاسبه می‌شود:

$$d_{ij}^2 = (x_i - x_j)^2 + (y_i - y_j)^2 + (z_i - z_j)^2 \quad (1)$$

در رابطه فوق، (x_i, y_i, z_i) و (x_j, y_j, z_j) به ترتیب مختصات دکارتی گره i و j است. در ادامه مدل انرژی مصرفی شبکه حسگر صوتی زیرآبی شرح داده می‌شود.



شکل ۱. قرارگیری گره‌های رله و حسگر در منطقه هدف استوانه‌ای و دستگاه مختصات دکارتی

۲-۱- مدل انرژی مصرفی

مقدار انرژی که صرف مخابره اطلاعات و پردازش آن می‌شود، کل

^۱depth adjustment system

e_i	انرژی باقیمانده گره i
E_p	انرژی اولیه گره‌ها
(x_i, y_i, z_i)	مختصات گره i
d_{ij}	فاصله اقلیدسی دو گره i و j
p_{ij}	توان مصرفی برای ارسال یک بیت اطلاعات از گره i به گره j
α	ضریب جذب محیط زیر آبی
d_t	فاصله آستانه
p_s	توان مصرفی برای پردازش یک بیت اطلاعات جهت ارسال
p_r	توان مصرفی برای پردازش یک بیت اطلاعات جهت دریافت
f	فرکانس سیگنال صوتی
τ_i	طول عمر گره i

شبکه موجود باشند [۱۳]، بنابراین، طول عمر شبکه (τ) مشابه [۱۳، ۲۰، ۲۶] به صورت زیر تعریف می‌شود:

$$\tau = \min(\tau_i), \forall i \in S \cup R, \quad (6)$$

در رابطه فوق، τ_i طول عمر گره نوعی i است و از رابطه زیر قابل محاسبه است [۲۰]:

$$\tau_i \left(\sum_{j \in SURUBS, i \neq j} p_{ij} r_{ij} + p_r \sum_{k \in SURUBS, k \neq i} r_{ki} \right) = e_i \quad (7)$$

لازم به ذکر است، p_r انرژی مصرفی گره i جهت دریافت یک بیت اطلاعات و r_{ij} بیانگر نرخ ارسالی از گره i به سمت گره j است. هم‌چنین، e_i انرژی باقی مانده گره i است. به منظور سهولت خوانندگان، لیست نمادهای مورد استفاده در مقاله در جدول ۱ آورده شده است. فرضیات مورد استفاده در این مقاله در زیر ذکر شده‌اند:

۳. روش پیشنهادی جایگذاری گره‌های رله

همان‌گونه که پیش از این بیان شد، در این مقاله جایگذاری گره‌های رله به منظور افزایش طول عمر شبکه مورد بررسی قرار گرفته است. طبق تعریف طول عمر شبکه در رابطه (۶)، گره‌ای که دارای کمترین طول عمر است زمان کارکرد شبکه را مشخص می‌کند و به عنوان گره بحرانی^۱ شناخته می‌شود. بنابراین، با قرار دادن گره رله اطراف گره مذکور طول عمر شبکه افزایش می‌یابد. برای این منظور، روش ERS برای تعیین مکان هر گره رله پیشنهاد می‌شود. هم‌چنین، تعیین مکان دقیق گره رله تحت مسئله برنامه‌ریزی محدب یکی دیگر از مباحثی است که در این مقاله به بررسی آن پرداخته شده است. در ادامه روش پیشنهادی به طور مفصل شرح داده می‌شود.

۳.۱ الگوریتم پیشنهادی ERS

گام اول برای جایگذاری گره رله، شناسایی گره بحرانی (تعیین‌کننده طول عمر شبکه) است، این گره به صورت b مشخص می‌شود. بدین معنی که:

$$b = \operatorname{argmin}(\tau_j), \forall j \in S \cup R. \quad (9)$$

همان‌گونه که از رابطه (۳) برمی‌آید، مخابره هر گره با دورترین گره هم‌سایه بیش‌ترین انرژی را مصرف می‌کند. در روش پیشنهادی به این مسئله توجه شده است و به منظور افزایش طول عمر شبکه، گره رله در خط واصل گره بحرانی شبکه و دورترین همسایه‌اش قرار

۱. اتصال بین گره‌های حسگر برقرار است و گره‌های رله به منظور افزایش طول عمر شبکه به آن اضافه می‌شوند.

۲. مکان گره‌های حسگر و انرژی باقی مانده آن‌ها معلوم است [۲۰].

۳. شبکه حسگر همگن فرض می‌شود و برد مخابراتی همه گره‌ها برابر است.

۴. پهنای باند کانال صوتی زیرآبی محدود فرض می‌شود. این شرط از ظرفیت محدود لینک مشخص شده با نماد β_{cap} منعکس می‌شود. شرط محدود بودن پهنای باند کانال صوتی زیرآبی بیان می‌دارد که مجموع نرخ ارسالی از هر گره بایستی کمتر از β_{cap} باشد، بدین معنی که [۲۰]:

$$\sum_{j \in SURUBS, i \neq j} r_{ij} \leq \beta_{cap}, \forall i \in S \cup R. \quad (8)$$

با داشتن اطلاعات کامل از مدل سیستم، در ادامه به شرح روش پیشنهادی برای قرارگیری گره‌های رله در شبکه پرداخته می‌شود.

جدول ۱. لیست نمادها و تشریح آن‌ها

نماد	تشریح
R	مجموعه گره‌های رله
S	مجموعه گره‌های حسگر
RT	برد مخابراتی گره‌های حسگر و رله
r_{ij}	نرخ ارسالی از گره i به گره j

^۱ Critical node

باشد گره رله روی آن منطبق می‌شود. با این نوع جایگذاری، گره رله مسئول مخابره با گره f تحت فاصله طولانی d_{bf} می‌شود که منجر به بحرانی شدن وضعیت آن و در نتیجه ناکارآمدی جایگذاری‌اش می‌شود. خصوصاً در جایگذاری هم‌زمان گره‌های حسگر و رله که هر دو نوع گره دارای انرژی باقی‌مانده برابر (همان انرژی اولیه یا E_p) هستند انرژی مصرفی گره‌های رله نیز از اهمیت خاصی برخوردار است. از این‌رو، هدف اصلی روش پیشنهادی افزایش طول عمر شبکه حسگر زیرآبی و تضمین ارسال اطلاعات جمع‌آوری شده توسط گره‌های حسگر به سمت ایستگاه پایه است. به بیانی دیگر، چنانچه گره بحرانی b توانایی ارسال اطلاعات دریافتی از گره‌های همسایه‌اش را نداشته باشد، اتصال او با آن‌ها

حفظ می‌شود. حال، مجموعه N_b به صورت زیر تعریف می‌شود

$$N_b = \{j; r_{jb} > 0\}. \quad (15)$$

که بیان‌گر کل گره‌هایی است که اطلاعات خود را به سمت گره b ارسال می‌کنند. شایان ذکر است که اتصال همواره دو گره b و j در صورتی وجود دارد که

$$\tau_b = \tau_j \quad (16)$$

از جهت دیگر، طبق آن چه پیش از این بیان شد توجه به توان مصرفی گره رله از اهمیت خاصی برخوردار است. بنابراین، به منظور دستیابی به مکان گره رله، یک مسئله بهینه‌سازی مقید در رابطه با طول عمر گره b به صورت زیر پیشنهاد و طرح می‌شود:

$$(x_r, y_r, z_r, p_{br}, d_{br}) = \operatorname{argmax} \tau_b \quad (17)$$

s.t.

$$\tau_b \leq \max(\tau_k), \forall k \in \{N_b\}, \quad (18)$$

$$x_r = x_b + \frac{x_f - x_b}{\|\vec{f} - \vec{b}\|} \times d_{br} \quad (19)$$

$$y_r = y_b + \frac{y_f - y_b}{\|\vec{f} - \vec{b}\|} \times d_{br} \quad (20)$$

$$z_r = z_b + \frac{z_f - z_b}{\|\vec{f} - \vec{b}\|} \times d_{br} \quad (21)$$

$$p_{br} = p_s + \alpha^{d_{br}} d_{br}^{\gamma}, 0 \leq d_{br} < d_t \quad (22)$$

$$p_{br} = p_s + \alpha^{d_{cr}} d_{cr}^{\xi}, d_t \leq d_{cr} \leq RT \quad (23)$$

$$d_{br}^{\gamma} = (x_b - x_r)^{\gamma} + (y_b - y_r)^{\gamma} + (z_b - z_r)^{\gamma} \quad (24)$$

مسئله فوق جزء مسائل بهینه‌سازی غیرمحدب در نظر گرفته می‌شود. این مسئله دارای تابع هدف محدب (بیان شده در (۲۵))،

می‌گیرد و به عنوان گره مسیریاب بین آن‌ها عمل می‌کند. بنابراین، در گام بعد دورترین همسایه گره b به صورت زیر شناسایی و f نام‌گذاری می‌شود:

$$f = \operatorname{argmax}(d_{bj}), \forall j \in \{k; r_{bk} > 0\}. \quad (10)$$

به منظور افزایش طول عمر گره بحرانی b ، گره رله r در خط واصل گره‌های f و b به صورت نشان داده شده در شکل ۲ قرار می‌گیرد، از مزایای این نوع جایگذاری می‌توان به موارد زیر اشاره کرد:

۱. در این نوع جایگذاری، مطمئناً گره رله در برد مخابراتی دو گره حسگر b و f قرار می‌گیرد و توانایی مخابره با آن‌ها را دارد.

۲. نوع جایگذاری رله از نوع کارآمد است، بدین معنی که از مخابره گره رله در فاصله‌ای بیش از طول لینک (b, f) جلوگیری می‌شود.

در صورتی که بردار مکان گره نوعی j با \vec{j} نمایش داده شود (ایستگاه پایه واقع بر مبدا مختصات است)، با توجه به شکل ۲ ارتباط \vec{r} با \vec{f} و \vec{b} به صورت زیر بیان می‌شود:

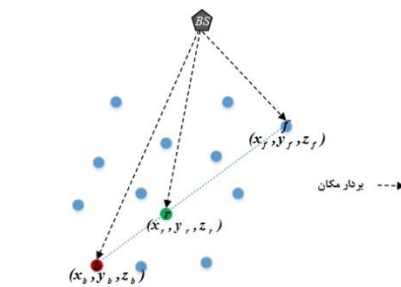
$$\vec{r} = \vec{b} + \frac{\vec{f} - \vec{b}}{\|\vec{f} - \vec{b}\|} \times d_{br} \quad (11)$$

در رابطه فوق، d_{br} فاصله اقلیدسی سه‌بعدی بین دو گره بحرانی و رله است. بنابراین، مختصات گره رله از طریق معادلات زیر به دست می‌آید:

$$x_r = x_b + \frac{x_f - x_b}{\|\vec{f} - \vec{b}\|} \times d_{br} \quad (12)$$

$$y_r = y_b + \frac{y_f - y_b}{\|\vec{f} - \vec{b}\|} \times d_{br} \quad (13)$$

$$z_r = z_b + \frac{z_f - z_b}{\|\vec{f} - \vec{b}\|} \times d_{br} \quad (14)$$



شکل ۲. قرارگیری گره رله در شبکه حسگر زیرآبی طبق روش پیشنهادی

واضح است اگر تنها هدف، بهینه‌سازی طول عمر گره بحرانی b

$$f_i(x) \leq 0, i = 1, 2, \dots, I \quad (28)$$

$$\psi_m(x) - t_m = 0, m = 1, 2, \dots, M \quad (29)$$

$$\Phi_m(x) - t_m = 0, m = 1, 2, \dots, M \quad (30)$$

همان‌گونه که پیش از این بیان شد، $f_i(x), i = 0, 1, \dots, I$ توابعی محدب هستند. هم‌چنین، دو قید (۳۲) و (۳۳) - که به صورت تفاسیل یک تابع محدب $\psi_m(x)$ یا $\Phi_m(x)$ و خطی (t_m) بیان شده‌اند - خاصیت تحدب را دارند (اثبات در پیوست آورده شده است). بنابراین جواب بهینه مسئله (۳۴) با حل مسئله معادل محدب (۲۰) به دست خواهد آمد.

اکنون با تعریف متغیر جدید t و اعمال تبدیل پیشنهادی فوق، مدل محدب پیشنهادی مسئله به صورت زیر حاصل می‌شود:

$$(x_r, y_r, z_r, p_{br}, d_{br}) = \operatorname{argmax}(t_b)$$

s.t.

$$t_b = \frac{e_b}{\sum_{j \neq f} p_{bj} r_{bj} + p_r \sum_{k \in \text{SUR}}^{k \neq b} r_{kb} + (r_{br} \times p_{br})}$$

$$t_b \leq \max(\tau_k), \forall k \in \{N_b\},$$

$$x_r = x_b + \frac{x_f - x_b}{\|\vec{f} - \vec{b}\|} \times d_{br}$$

$$y_r = y_b + \frac{y_f - y_b}{\|\vec{f} - \vec{b}\|} \times d_{br}$$

$$z_r = z_b + \frac{z_f - z_b}{\|\vec{f} - \vec{b}\|} \times d_{br}$$

$$p_{br} = p_s + \alpha^{d_{br}} d_{br}^\gamma, 0 \leq d_{br} < d_t$$

$$p_{br} = p_s + \alpha^{d_{cr}} d_{cr}^\xi, d_t \leq d_{cr} \leq RT$$

$$t = (x_b - x_r)^\gamma + (y_b - y_r)^\gamma + (z_b - z_r)^\gamma$$

$$d_{br}^\gamma = t \quad (31)$$

بنابراین، مسئله جایگذاری گره رله فوق به دسته مسائل برنامه‌ریزی محدب تعلق دارد، در این مقاله برای حل آن از جعبه ابزار CVX موجود در نرم افزار متلب استفاده شده است.

قیود آفینی^۱ (بیان شده در (۲۶) - (ج.۲۷))، قیود محدب (بیان شده در (۲۸) و (۲۹)) و تفاضل محدب^۲ (قید (۳۰)) است. وجود قید غیر محدب (۵.۳۱)، منجر به غیرمحدب شدن مسئله فوق می‌شود که حصول به مکان بهینه گره رله را دشوار می‌سازد. از این‌رو، جهت غلبه بر این چالش، در ادامه ابتدا فرم کلی این گونه مسائل شناخته و معرفی می‌شوند، سپس با پیشنهاد یک تبدیل جدید مسئله فوق به همتای محدب خود تبدیل می‌شود.

b. مسئله غیرمحدب جایگذاری گره‌های رله و معادل

محدب پیشنهادی

در این بخش، ابتدا گروه خاصی از مسائل غیرمحدب شامل تابع هدف محدب، قیود محدب (یا آفینی) و تفاضل محدب معرفی و شرح داده می‌شوند. بعد از آن با پیشنهاد و اعمال یک تبدیل جدید بر این مسائل، به معادل محدب آن‌ها دست خواهیم یافت. فرم کلی مسائل شامل تابع هدف محدب، قیود محدب و تفاضل محدب به صورت زیر فرمول‌بندی می‌شود:

$$x = \operatorname{argmin} f.(x)$$

s.t.

$$f_i(x) \leq 0, i = 1, 2, \dots, I$$

$$h_m(x) = 0, m = 1, 2, \dots, M \quad (25)$$

به گونه‌ای که x نشان‌دهنده بردار متغیرها و $f_i(x), i = 0, 1, \dots, I$ توابعی محدب یا آفینی هستند. هم‌چنین، $h_m(x), m = 1, 2, \dots, M$ توابع تفاضل محدب هستند و به صورت زیر فرمول‌بندی می‌شوند:

$$h_m(x) = \Phi_m(x) - \psi_m(x) \quad (26)$$

همان‌گونه که از نام این نوع توابع مشخص است، دو تابع $\psi_m(x)$ و $\Phi_m(x)$ محدب هستند و اصطلاحاً اجزای محدب تابع $h_m(x)$ نامیده می‌شوند [۲۸].

با پیشنهاد و معرفی متغیر جدید $t = [t_1, \dots, t_M] \in \mathbb{R}^M$ مسئله (۲۵) به صورت زیر می‌تواند فرمول‌بندی شود:

$$(x, t) = \operatorname{argmin} f.(x) \quad (27)$$

s.t.

^۱ Affine constraints

^۲ Difference convex

$$\begin{aligned} dx_b &\approx dx_r \approx dx_f, \\ dy_b &\approx dy_r \approx dy_f, \\ dz_b &\approx dz_r \approx dz_f \end{aligned} \quad (۳۵)$$

حال می‌توان گفت:

$$d_{br}' \approx d_{br} \quad (۳۶)$$

به طریق مشابه برای تغییرات صورت گرفته در $\|\vec{f} - \vec{b}\|$ قابل اثبات است. با جایگذاری شرط (۴۵) و (۴۶) در روابط (۴۲)، (۴۳) و (۳۷) داریم:

$$\begin{aligned} x_r &= x_b + \frac{x_f - x_b}{\|\vec{f} - \vec{b}\|} \times d_{br} \\ y_r &= y_b + \frac{y_f - y_b}{\|\vec{f} - \vec{b}\|} \times d_{br} \\ z_r &= z_b + \frac{z_f - z_b}{\|\vec{f} - \vec{b}\|} \times d_{br} \end{aligned}$$

بنابراین، با توجه به هندسه مسئله طرح شده و نکات عملی بیان شده، می‌توان گفت که تغییرات مکانی تاثیر چندانی بر عملکرد روش پیشنهادی نخواهد داشت.

در ادامه به ارزیابی روش پیشنهادی جایگذاری گره رله (ERS) از لحاظ پیچیدگی و عملکرد پرداخته می‌شود و با روش ابتکاری RA موجود در [۲۰] مقایسه می‌شود.

۵. ارزیابی عملکرد

در این بخش ابتدا با تحلیل پیچیدگی زمانی روش پیشنهادی و پس از آن با ارائه و تشریح نتایج حاصل از شبیه‌سازی، به ارزیابی عملکرد روش پیشنهادی پرداخته می‌شود.

a. تحلیل پیچیدگی

مرسوم‌ترین روش برای به دست آوردن مرتبه پیچیدگی یک الگوریتم تعیین تعداد محاسبات آن شامل جمع، ضرب، تقسیم، جستجوی خطی و انتساب است. محاسبات روش پیشنهادی ERS در جدول ۲ آورده شده است. اگر فرض شود که تعداد گره‌های ح سگر و رله برابر N و M باشد - با توجه به جدول ۱ - پیچیدگی روش پیشنهادی ERS به مرتبه زیر محدود می‌شود:

$$(N + M)^2 + (N + M) \times iter \quad (۳۸)$$

به‌گونه‌ای که $iter$ همان تعداد تکرار اجرای مسئله بهینه‌سازی برای رسیدن به جواب بهینه است. با توجه به این که تعداد تکرار نسبت به $N+M$ کمتر است، بنابراین مرتبه پیچیدگی برابر $(N + M)^2$ است. طبق محاسبات [۲۰] پیچیدگی روش RA برابر همین مرتبه

۴. بررسی بهره‌وری روش پیشنهادی جایگذاری

گره رله در برابر تغییرات محیط زیرآبی

به منظور حفظ کارایی شبکه‌های حسگر زیرآبی، گره‌های زیرآبی بایستی نسبت به تغییرات شدید زیرآبی و وضعیت پایداری داشته باشند. در حقیقت، تغییرات مکانی زیاد موجب خارج شدن گره‌ها از دید مخابراتی یکدیگر و مختل شدن کل شبکه حسگر می‌شود. در نتیجه این امر، نظارت بر محیط زیرآبی سخت و گاهی غیر ممکن خواهد بود. برای این منظور تمهیداتی چون توسعه سخت افزار گره‌ها و استفاده از گره‌های نیمه ساکن به جای گره‌های شناور آزاد صورت گرفته است. بنابراین، تغییر مکان گره‌های زیرآبی به صورت جزئی و در یک ناحیه محدود فرض می‌شود [۳۰].

از آن جا که مکان گره نوعی i توسط سه مولفه (x_i, y_i, z_i) مشخص می‌گردد، جابجایی مکانی آن به صورت (dx_i, dy_i, dz_i) قابل بیان است. بنابراین، (dx_r, dy_r, dz_r) ، (dx_b, dy_b, dz_b) و (dx_f, dy_f, dz_f) به ترتیب بیان گر تغییر مکان گره رله (r)، گره بحرانی (b)، دورترین همسایه گره بحرانی (f) هستند. از طرفی طبق روش پیشنهادی، مکان گره رله توسط سه رابطه (۳۵)، (۳۶) و (۳۷) حاصل می‌شود. با در نظر گرفتن جابجایی هر یک از گره‌ها روابط مذکور به صورت زیر بازنویسی خواهند شد:

$$x_r + dx_r = x_b + dx_b \quad (۳۲)$$

$$+ \frac{x_f + dx_f - x_b - dx_b}{\|\vec{f} - \vec{b}\|}$$

$$\times d_{br}'$$

$$y_r + dy_r = y_b + dy_b \quad (۳۳)$$

$$+ \frac{y_f + dy_f - y_b - dy_b}{\|\vec{f} - \vec{b}\|}$$

$$\times d_{br}'$$

$$z_r + dz_r = z_b + dz_b \quad (۳۴)$$

$$+ \frac{z_f + dz_f - z_b - dz_b}{\|\vec{f} - \vec{b}\|}$$

$$\times d_{br}'$$

بگونه‌ای که:

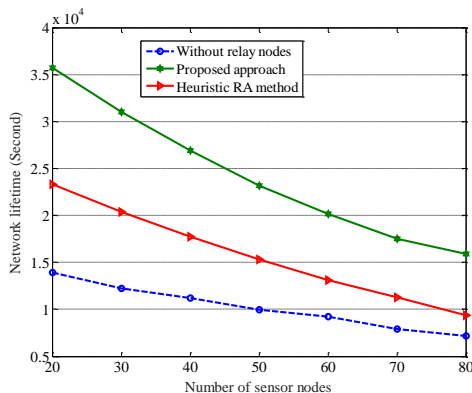
$$d_{br}' = \sqrt{(x_b + dx_b - x_r - dx_r)^2 + (y_b + dy_b - y_r - dy_r)^2 + (z_b + dz_b - z_r - dz_r)^2}$$

با توجه به همگن بودن شبکه ح سگر صوتی زیرآبی (طبق فرض ۳ مقاله) و قرارگیری سه گره f ، b و r در برد مخابراتی یکدیگر (فاصله نسبتاً نزدیک)، می‌توان بیان کرد:

۴۰۰ کیلوژول	انرژی اولیه گره‌ها
۱۰-۲۰۰ بیت بر ثانیه	نرخ تولیدی هر گره حسگر
۸۷ متر	فاصله آستانه

در اولین بخش ارزیابی، عملکرد روش پیشنهادی در سائزهای (تعداد گره‌های حسگر) مختلف شبکه بررسی شده است. از این رو در شرایطی کاملاً یکسان به جایگذاری تعداد یکسانی از گره‌های رله (۳۰٪ تعداد گره‌های حسگر) به دو روش RA و پیشنهادی (ERS) پرداخته شده است. نتایج این بررسی در شکل ۳ نشان داده شده است. همان‌گونه که از شکل ۳ مشخص است، با افزایش تعداد گره‌های حسگر طول عمر شبکه کاهش می‌یابد. در حقیقت، افزایش تعداد گره‌های حسگر در شبکه منجر به افزایش حجم اطلاعات ارسالی توسط گره بحرانی شبکه و در نتیجه افزایش انرژی مصرفی آن می‌شود؛ این مسئله باعث کاهش طول عمر شبکه می‌شود. به علاوه، همان‌گونه که مشخص است عملکرد روش پیشنهادی ERS به مراتب از روش RA بهتر است. در حقیقت، روش پیشنهادی با بکارگیری مسئله بهینه‌سازی ریاضی و تبدیل آن به یک مسئله محذب توانایی حصول به مکان بهینه گره‌های رله را دارد.

در مقابل، طبق روش ابتکاری RA ابتدا گره‌های رله روی سطح آب جایگذاری می‌شوند و سپس عمق آن‌ها تنظیم می‌شود. جدا سازی مختصات گره رله از سویی و قرارگیری گره‌های رله در مکان‌های پرت از سویی دیگر منجر به عملکرد شبه‌بهینه روش RA شده است.



شکل ۳. بررسی عملکرد روش پیشنهادی برای تعداد مختلف گره حسگر

لازم به ذکر است، در غیاب گره رله در شبکه به دلیل فاصله مخابراتی طولانی بین گره‌های حسگر طول عمر شبکه در پایین‌ترین

است. در ادامه به بررسی عملکرد و طول عمر روش پیشنهادی با حفظ مرتبه پیچیدگی پرداخته می‌شود.

جدول ۲. محاسبات روش پیشنهادی ERS

نوع عملگر	مرتبه اجرایی	دفعات محاسبه	مرتبه پیچیدگی
جستجوی خطی	۱	$2 \times (N + M) - 5$	$N + M$
انتساب	۱	$4 + (6 \times iter)$	$iter$
جمع	۱	$(N + M - 1)^2 + (N + M + 14) \times iter$	$(N + M)^2 + (N + M) \times iter$
تقسیم	۱	$(N + M - 1) + 2 \times iter$	$(N + M) + 2 \times iter$
ضرب	۱	$(N + M - 1)^2 + (N + M + 15) \times iter$	$(N + M)^2 + (N + M) \times iter$

b. شبیه‌سازی و تحلیل نتایج روش پیشنهادی

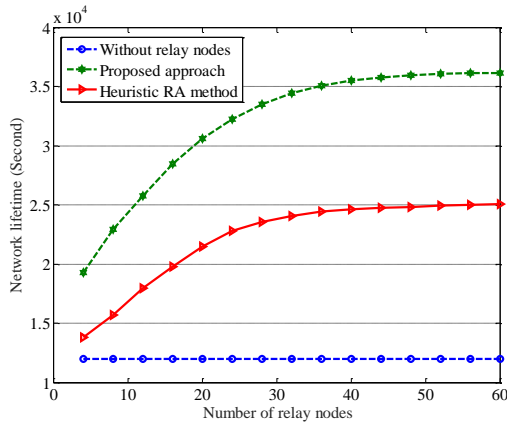
در این بخش، عملکرد روش پیشنهادی با روش ابتکاری RA مقایسه می‌شود. پیش از تشریح کامل بررسی‌های صورت گرفته، پارامترهای مسئله باید تعیین گردند: عمق آب ۲۰۰۰ متر فرض شده است، نرخ تولیدی هر گره حسگر به صورت تصادفی از ۱۰ تا ۲۰۰ بیت بر ثانیه تنظیم شده است، به علاوه انرژی اولیه هر گره ۴۰۰ کیلو ژول انتخاب شده است [۲۰]. به طور کلی تمام پارامترهای معین در جدول ۳ آورده شده است. در ادامه به تشریح بررسی‌های صورت گرفته، پرداخته می‌شود.

جدول ۳. پارامترهای شبیه‌سازی

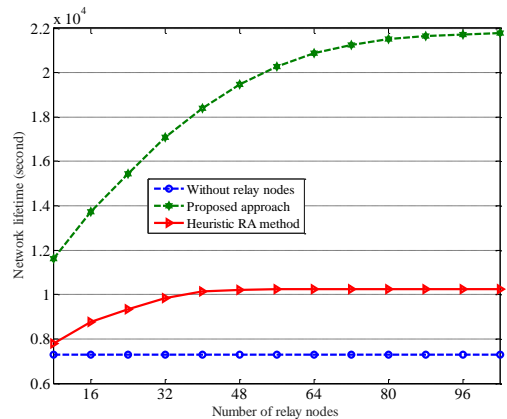
پارامتر	مقدار
عمق آب	۲۰۰۰ متر
برد مخابراتی گره‌ها	۵۰۰ متر
فرکانس سیگنال صوتی	۱ کیلوهرتز
توان مصرفی برای پردازش هر بیت داده ارسالی	۱ میلی‌وات
توان مصرفی برای پردازش هر بیت داده دریافتی	۱ میلی‌وات
ظرفیت پیوند مخابراتی	۱۰ کیلوبیت بر ثانیه

مقدار قرار دارد.

در آزمایش دوم، اثر افزایش تعداد گره‌های رله بر طول عمر شبکه بررسی شده است. برای این منظور، طول عمر شبکه بر حسب تعداد گره رله رسم شده است. این بررسی برای سه سایز شبکه (۲۰، ۴۰ و ۸۰) انجام شده است. در هر سایز، تعداد گره‌های رله از ۰.۱ تا ۱.۸ برابر تعداد گره‌های حسگر تغییر می‌کند. نتایج این ارزیابی در شکل ۴ آورده شده است. همان‌گونه که از شکل ۴ برمی‌آید، در هر دو نوع روش جایگذاری گره رله (روش ابتکاری RA و روش پیشنهادی) با افزایش تعداد گره‌های رله طول عمر شبکه افزایش می‌یابد، اما عملکرد روش پیشنهادی به مراتب از روش ابتکاری RA بیشتر است. همان‌گونه که پیش از این بیان شد، در روش RA ابتدا مکان اولیه گره‌های رله (مختصات XY) روی سطح آب مشخص می‌شود و پس از آن بدون عوض کردن دو مختصه اولیه، عمق آن‌ها تنظیم می‌شود. در حالی که در روش پیشنهادی مکان‌دهی گره رله به صورت یک مسئله بهینه‌سازی ریاضی فرمول‌بندی شده است که با استفاده از یک تبدیل به همتای محدب خود تبدیل شده است. واضح است که پیدا کردن هم‌زمان سه مختصه گره رله تحت یک مسئله بهینه‌سازی محدب باعث عملکرد بالای روش پیشنهادی شده است.



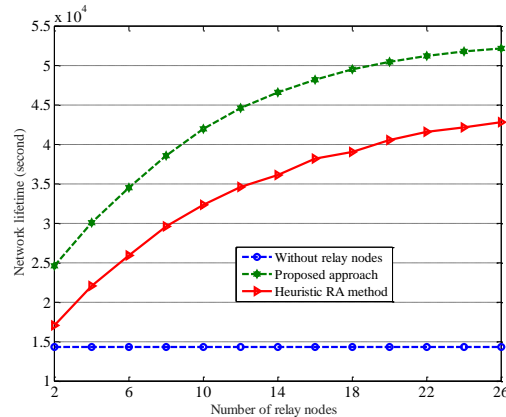
ب. تعداد ۴۰ گره حسگر



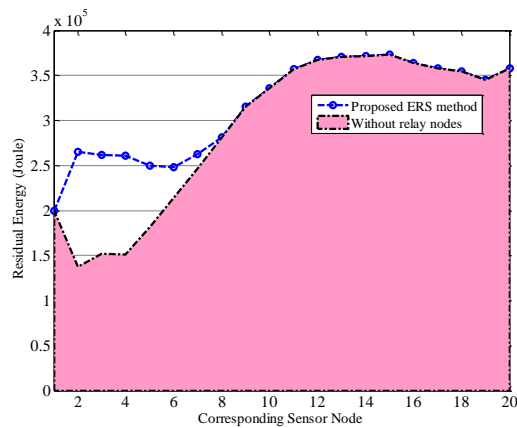
پ. تعداد ۸۰ گره حسگر

شکل ۴: بررسی عملکرد روش پیشنهادی در تعدادهای مختلف گره رله، به ازای سایزهای مختلف شبکه

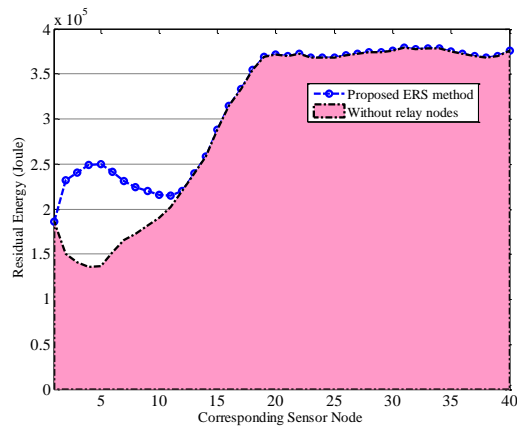
مسئله مهم دیگری که باید مورد توجه قرار داد عملکرد روش‌های جایگذاری در سایزهای مختلف شبکه است. به طور مثال روش ابتکاری RA در سایز بالای شبکه (۸۰) عملکرد بسیار ضعیفی دارد و طول عمر بسیار سریع به بالاترین مقدار خود می‌رسد. در حقیقت، در روش RA به هر میزان که تعداد گره‌های حسگر افزایش می‌یابد احتمال قرارگیری گره رله بین گره‌های حسگر کاهش می‌یابد. بدین معنی که، با افزایش تعداد گره‌های حسگر فاصله بین آن‌ها کاهش می‌یابد و گره‌های رله‌ای که روی سطح آب ثابت شده‌اند کارایی خود را در کاهش فاصله مخابراتی بین گره‌های حسگر از دست می‌دهند. در حالی که در روش پیشنهادی مکان بهینه گره رله تحت یک مسئله برنامه‌ریزی ریاضی به منظور افزایش طول عمر شبکه به



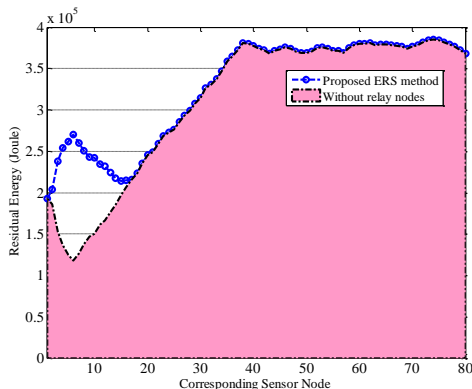
آ. تعداد ۲۰ گره حسگر



آ. تعداد ۲۰ گره حسگر



ب. تعداد ۴۰ گره حسگر



پ. تعداد ۸۰ گره حسگر

شکل ۵. بررسی عملکرد روش پیشنهادی در رفع حفره انرژی

دست می‌آید. لازم به ذکر است که رسیدن به حداکثر عملکرد زمانی اتفاق می‌افتد که طول عمر گره بحرانی به شدت پایین است و گره حسگر روی آن قرار می‌گیرد.

در آخرین ارزیابی، توانایی دو روش RA و ERS پیشنهادی در حل مسئله حفره انرژی در شبکه حسگر صوتی زیرآبی سه‌بعدی بررسی شده است. برای این منظور، برای سایزهای مختلف شبکه (۲۰، ۴۰ و ۸۰ گره حسگر) انرژی باقی‌مانده گره‌های حسگر بررسی شده است. همچنین، عملکرد هر یک از روش‌های RA و روش پیشنهادی در رفع حفره انرژی ناشی از مصرف نامتعادل انرژی مورد ارزیابی قرار گرفته است. نتایج این بررسی در شکل‌های ۵ و ۶ آورده شده است. همان‌گونه که مشخص است، هر دو روش جایگذاری، سعی در متعادل کردن مصرف انرژی بین گره‌های حسگر و رفع حفره انرژی دارند، اما روش پیشنهادی ERS در حل این قضیه مطلوب‌تر عمل می‌کند. در حقیقت، روش پیشنهادی با حفظ اتصال گره بحرانی و همسایگان آن امکان دستیابی به مصرف توان متعادل‌تر بین گره‌های حسگر را دارد.

۶. نتیجه‌گیری

در این مقاله مسئله جایگذاری گره رله به منظور افزایش طول عمر شبکه‌های حسگر صوتی زیرآبی مورد مطالعه قرار گرفته است. به منظور قرارگیری بهینه گره‌های رله در شبکه حسگر زیرآبی، روشی به نام ERS پیشنهاد شده است، به گونه‌ای که مکان بهینه گره‌های رله در دو گام مشخص شده است. در گام اول مسئله جایگذاری به صورت یک مسئله برنامه‌ریزی غیرمحدب فرمول‌بندی شده است و در گام بعد با معرفی یک تبدیل جدید مسئله غیرمحدب مذکور به معادل محدب خود تبدیل شده است. نتایج شبیه‌سازی نشان‌دهنده عملکرد مناسب روش پیشنهادی از لحاظ رفع حفره انرژی و طول عمر شبکه است.

مراجع

[۱] M. Erol-Kantarci, H. T. Mouftah, and S. Oktug, "A survey of architectures and localization techniques for underwater acoustic sensor networks," *IEEE Communications Surveys & Tutorials*, vol. ۱۳, no. ۳, pp. ۴۸۷-۵۰۲, ۲۰۱۱.

[۲] S. Climent, A. Sanchez, J. V. Capella, N. Meratnia, and J. J. Serrano, "Underwater acoustic wireless sensor networks: advances and future trends in physical, MAC and routing layers," *Sensors*, vol. ۱۴, no. ۱, pp. ۷۹۵-۸۳۳, ۲۰۱۴.

[۳] G. Qiao, Z. Babar, L. Ma, S. Liu, and J. Wu, "MIMO-OFDM underwater acoustic communication systems—A review," *Physical Communication*, vol. ۲۳, pp. ۵۶-۶۴, ۲۰۱۷.

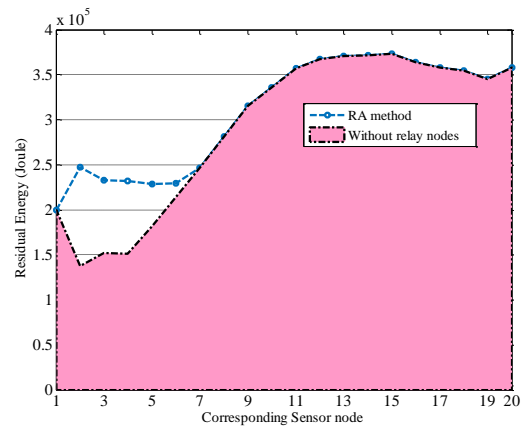
[۴] M. Patil and R. C. Biradar, "A survey on routing protocols in wireless sensor networks," in *Networks (ICON), ۲۰۱۲ ۱۸th IEEE International Conference on*, ۲۰۱۲, pp. ۸۶-۹۱: IEEE.

[۵] I. F. Akyildiz, D. Pompili, and T. Melodia, "Underwater acoustic sensor networks: research challenges," *Ad hoc networks*, vol. ۳, no. ۳, pp. ۲۵۷-۲۷۹, ۲۰۰۵.

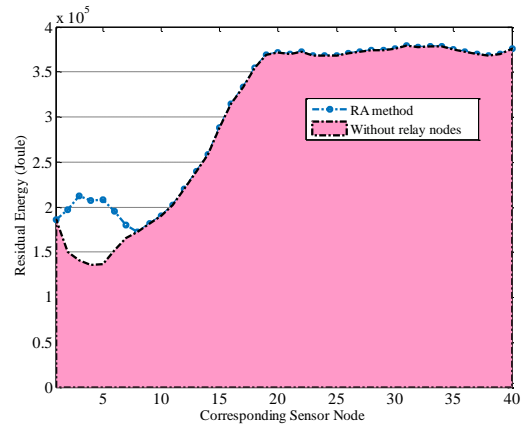
[۶] A. Wadaa, S. Olariu, L. Wilson, M. Eltoweissy, and K. Jones, "Training a wireless sensor network," *Mobile Networks and Applications*, vol. ۱۰, no. ۱-۲, pp. ۱۵۱-۱۶۸, ۲۰۰۵.

[۷] E. L. Lloyd and G. Xue, "Relay node placement in wireless sensor networks," *IEEE Transactions on Computers*, vol. ۵۶, no. ۱, pp. ۱۳۴-۱۳۸, ۲۰۰۷.

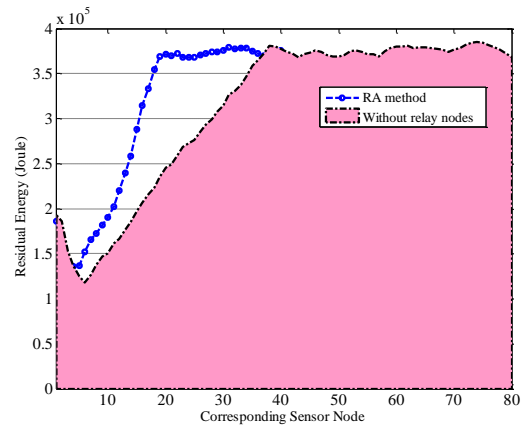
[۸] S. Misra, S. D. Hong, G. Xue, and J. Tang, "Constrained relay node placement in wireless sensor networks: Formulation and approximations," *IEEE/ACM Transactions on Networking (TON)*, vol. ۱۸, no. ۲, pp. ۴۳۴-۴۴۷, ۲۰۱۰.



آ. تعداد ۲۰ گره حسگر



ب. تعداد ۴۰ گره حسگر



ت. تعداد ۸۰ گره حسگر

شکل ۶. بررسی عملکرد روش ابتکاری RA در رفع حفره انرژی

- [۱۸] H. U. Yıldız, "Improvement of underwater acoustic sensor networks performance with fountain codes," in *۲۰۱۹ ۲۷th Signal Processing and Communications Applications Conference (SIU)*, ۲۰۱۹, pp. ۱-۴: IEEE.
- [۱۹] B. Das, E. S. Mishra, and S. K. Sethi, "Enhancement of Lifetime of Acoustic Sensor using PEGASIS Algorithm in UASN," *International Journal of Electronics, Electrical and Computational System (Mc Graw Hill Publication)*, vol. ۶, no. ۹, pp. ۵۳۴-۵۴۵, ۲۰۱۷.
- [۲۰] L. Liu, M. Ma, C. Liu, and Y. Shu, "Optimal relay node placement and flow allocation in underwater acoustic sensor networks," *IEEE Transactions on Communications*, vol. ۶۵, no. ۵, pp. ۲۱۴۱-۲۱۵۲, ۲۰۱۷.
- [۲۱] Z. Mohammadi, M. Soleimanpour-Moghadam, M. Askarizadeh, and S. Talebi, "Increasing the Lifetime of Underwater Acoustic Sensor Networks: Difference Convex Approach," *IEEE Systems Journal*, ۲۰۲۰.
- [۲۲] Z. Mohammadi, M. Soleimanpour-Moghadam, S. Talebi, and D. Abbasi-Moghadam, "A new optimization algorithm for relay node setting in underwater acoustic sensor networks," in *۲۰۱۸ ۳rd Conference on Swarm Intelligence and Evolutionary Computation (CSIEC)*, ۲۰۱۸, pp. ۱-۵: IEEE.
- [۲۳] S. Boyd, S. P. Boyd, and L. Vandenberghe, *Convex optimization*. Cambridge university press, ۲۰۰۴.
- [۲۴] C.-Y. Chi, W.-C. Li, and C.-H. Lin, *Convex optimization for signal processing and communications: from fundamentals to applications*. CRC press, ۲۰۱۷.
- [۲۵] W. H. Thorp, "Analytic description of the low-frequency attenuation coefficient," *The Journal of the Acoustical Society of*
- [۹] K. Lu, G. Liu, R. Mao, and Y. Feng, "Relay node placement based on balancing power consumption in wireless sensor networks," *IET wireless sensor systems*, vol. ۱, no. ۱, pp. ۱-۶, ۲۰۱۱.
- [۱۰] A. Wahid, S. Lee, and D. Kim, "An energy-efficient routing protocol for UWSNs using physical distance and residual energy," in *OCEANS ۲۰۱۱ IEEE-Spain*, ۲۰۱۱, pp. ۱-۶: IEEE.
- [۱۱] A. Wahid, S. Lee, and D. Kim, "A reliable and energy-efficient routing protocol for underwater wireless sensor networks," *International Journal of Communication Systems*, vol. ۲۷, no. ۱۰, pp. ۲۰۴۸-۲۰۶۲, ۲۰۱۴.
- [۱۲] N. Javaid, M. Shah, A. Ahmad, M. Imran, M. I. Khan, and A. V. Vasilakos, "An enhanced energy balanced data transmission protocol for underwater acoustic sensor networks," *Sensors*, vol. ۱۶, no. ۴, p. ۴۸۷, ۲۰۱۶.
- [۱۳] M. Akbar, N. Javaid, A. H. Khan, M. Imran, M. Shoaib, and A. Vasilakos, "Efficient data gathering in ۳D linear underwater wireless sensor networks using sink mobility," *Sensors*, vol. ۱۶, no. ۳, p. ۴۰۴, ۲۰۱۶.
- [۱۴] J. U. Khan and H.-S. Cho, "A distributed data-gathering protocol using AUV in underwater sensor networks," *Sensors*, vol. ۱۵, no. ۸, pp. ۱۹۳۳۱-۱۹۳۵۰, ۲۰۱۵.
- [۱۵] K. Wang, H. Gao, X. Xu, J. Jiang, and D. Yue, "An energy-efficient reliable data transmission scheme for complex environmental monitoring in underwater acoustic sensor networks," *IEEE Sensors Journal*, vol. ۱۶, no. ۱۱, pp. ۴۰۵۱-۴۰۶۲, ۲۰۱۶.
- [۱۶] X. Du, K. Li, X. Liu, and Y. Su, "RLT code based handshake-free reliable MAC protocol for underwater sensor networks," *Journal of Sensors*, vol. ۲۰۲۰۱۶, ۱۶.
- [۱۷] H. U. Yıldız, "Maximization of underwater sensor networks lifetime via fountain codes," *IEEE Transactions on Industrial*

- [۲۹] C. Detweiler, M. Doniec, I. Vasilescu, and D. Rus, "Autonomous depth adjustment for underwater sensor networks: Design and applications," *IEEE/ASME Transactions on Mechatronics*, vol. ۱۷, no. ۱, pp. ۱۶-۲۴, ۲۰۱۱.
- [۳۰] N. Nowsheen, G. Karmakar, and J. Kamruzzaman, "PRADD: A path reliability-aware data delivery protocol for underwater acoustic sensor networks," *Journal of Network and Computer Applications*, vol. ۷۵, pp. ۳۸۵-۳۹۷, ۲۰۱۶.
- [۳۱] S. Boyd and L. Vandenberghe, *Convex optimization*. Cambridge university press, ۲۰۰۴.
- America, vol. ۴۲, no. ۱, pp. ۲۷۰-۲۷۰, ۱۹۶۷.
- [۲۶] J. Cao, J. Dou, and S. Dong, "Balance transmission mechanism in underwater acoustic sensor networks," *International Journal of Distributed Sensor Networks*, vol. ۱۱, no. ۳, p. ۴۶۹۳۴۰, ۲۰۱۵.
- [۲۷] N. Javaid, M. R. Jafri, Z. A. Khan, U. Qasim, T. A. Alghamdi, and M. Ali, "Iamctd :Improved adaptive mobility of courier nodes in threshold-optimized dbr protocol for underwater wireless sensor networks," *International Journal of Distributed Sensor Networks*, vol. ۱۰, no. ۱۱, p. ۲۱۳۰۱۲, ۲۰۱۴.
- [۲۸] R. Horst and N. V. Thoai, "DC programming: overview," *Journal of Optimization Theory and Applications*, vol. ۱۰۳, no. ۱, pp. ۱-۴۳, ۱۹۹۹.

هم‌چنین، با توجه به تعریف تابع محدب، عبارت زیر برای تابع محدب $g(x)$ صدق می‌کند:

$$g(\theta x + (1 - \theta)y) \leq \theta g(x) + (1 - \theta)g(y) \quad (۴۱)$$

با تفریق مساوی (۴۰) از نام مساوی (۴۱) عبارت زیر حاصل می‌شود:

$$g(\theta x + (1 - \theta)y) - f(\theta x + (1 - \theta)y) \leq \theta g(x) + (1 - \theta)g(y) - (\theta f(x) + (1 - \theta)f(y)) \quad (۴۲)$$

بنابراین،

$$k(\theta x + (1 - \theta)y) \leq \theta k(x) + (1 - \theta)k(y) \quad (۴۳)$$

در نتیجه، تابع $k(x)$ محدب است و مسئله یک مسئله برنامه‌ریزی محدب است.

پیوست: اثبات تحدب دو قید (۲.۲۰) و

(۲.۲۰) ث)

همان گونه که می‌دانیم، برای بررسی تحدب تابع دلخواه $k(x)$ شرط باید زیر بررسی شود:

$$k(\theta x + (1 - \theta)y) \leq \theta k(x) + (1 - \theta)k(y) \quad (۳۹)$$

به طوری که x و y نقاطی در دامنه تابع $k(x)$ باشند و $0 \leq \theta \leq 1$ [۳۱]. $k(x)$ تحت دو قید (۲.۲۰) و (۲.۲۰) ث)

به صورت زیر قابل بیان هست:

$$k(x) = g(x) - f(x)$$

به گونه‌ای که $g(x)$ و $f(x)$ به ترتیب بیان‌گر توابع محدب و خطی هستند. واضح است که در تابع خطی $f(x)$ شرط زیر صدق می‌کند:

$$f(\theta x + (1 - \theta)y) = \theta f(x) + (1 - \theta)f(y) \quad (۴۰)$$

