

## الگوریتم مسیریابی مقرون به صرفه و انرژی کارآمد در شبکه‌های حسگر بیسیم بدن بر اساس بهینه‌ترین مسیر

محبوبه شمسی<sup>۱</sup>، عبدالرضا رسولی<sup>۲</sup>، مرجان هاشمی<sup>۳</sup>

۱- استادیار، دانشگاه صنعتی قم

۲- استادیار، دانشگاه صنعتی قم

۳- دانشجوی کارشناسی ارشد، دانشگاه صنعتی قم

:

shamsi@qut.ac.ir

### خلاصه

شبکه‌های حسگر بیسیم بدن نوعی از شبکه‌های حسگر بیسیم هستند که شامل مجموعه‌ای از گره‌های حسگر پزشکی می‌باشند. این گره‌های حسگر به صورت‌های مختلف پوشیدنی و کاشتنی برای جمع‌آوری اطلاعات حیاتی در بدن انسان قرار می‌گیرند. یکی از مهم‌ترین چالش‌ها در این شبکه‌ها محدودیت انرژی گره‌های حسگر است. در این مقاله یک الگوریتم مسیریابی بر اساس مسیر بهینه برای افزایش طول عمر شبکه پیشنهاد شده است. روش پیشنهادی از دسته بندی گره‌ها به دو دسته عادی و اضطراری، استفاده از تابع هزینه، یافتن بهینه‌ترین مسیر و همچنین تغییر محدوده ارسالی گره‌ها عمل می‌کند. تجزیه و تحلیل و نتیجه شبیه‌سازی الگوریتم نشان داده شده است. بر اساس این نتایج عملکرد الگوریتم بررسی شده و نشان می‌دهد که مصرف انرژی گره‌ها در شبکه کاهش یافته و چرخه زندگی شبکه به طور قابل توجهی گسترش یافته است. این روش نسبت به روش مقایسه شده بیش از ۲۲ درصد بهبود داشته است.

کلمات کلیدی: افزایش عمر شبکه، تابع هزینه، شبکه‌های حسگر بیسیم بدن، کاهش مصرف انرژی، کوتاه‌ترین مسیر در گراف

### ۱. مقدمه

شبکه‌های حسگر بیسیم بدنی زیر مجموعه‌ای از شبکه‌های سنسوری هستند که به صورت‌های مختلف بر روی لباس یا بدن قرار می‌گیرند و یا در زیر پوست کاشته می‌شوند. با استفاده از این شبکه‌ها بیمار به راحتی می‌تواند جابه‌جا شود و حرکت فیزیکی بیشتری داشته باشد. تفاوت‌هایی بین ساختار بدن و محیطی که در آن زندگی می‌کنیم وجود دارد به همین دلیل بین شبکه‌های حسگر بیسیم بدنی و دیگر شبکه‌های سنسوری تفاوت‌هایی از نظر اندازه، انرژی مصرفی، تحمل خرابی و... وجود دارد. این شبکه‌ها در زمینه‌های دیگری نیز کاربرد دارند مانند کاربردهای تجاری، ورزشی، نظامی و... مهم‌ترین کاربرد این شبکه‌ها در حوزه پزشکی است. با استفاده از سنسورهای این شبکه می‌توان علائم حیاتی مانند اکسیژن اشباع خون، فشار خون، ضربان قلب، فعالیت قلب و تشخیص حرکت با استفاده از حسگرهای حرکتی، حسگرهای الکتروکاردیوگرام و غیره را به منظور تشخیص زود هنگام خطرات اندازه‌گرفت و از طریق اشتراک گذاری با پزشکان، پرستاران و دیگر مراقبت‌کننده‌ها مورد نظارت قرار داد. [۱] به همین دلیل بیمار می‌تواند فعالیت روزانه عادی خود را داشته باشد. مانیتورینگ مداوم شبکه‌های حسگر بدنی امکان تشخیص زود هنگام شرایط اورژانسی بیماران را فراهم می‌کند و سرویس‌های سلامت را برای افراد با ناتوانی‌های مختلف ادراکی، حسی و حرکتی فراهم می‌کند.

<sup>۱</sup> استادیار، دانشکده مهندسی برق و کامپیوتر، دانشگاه صنعتی قم، قم

<sup>۲</sup> استادیار، دانشکده مهندسی برق و کامپیوتر، دانشگاه صنعتی قم، قم

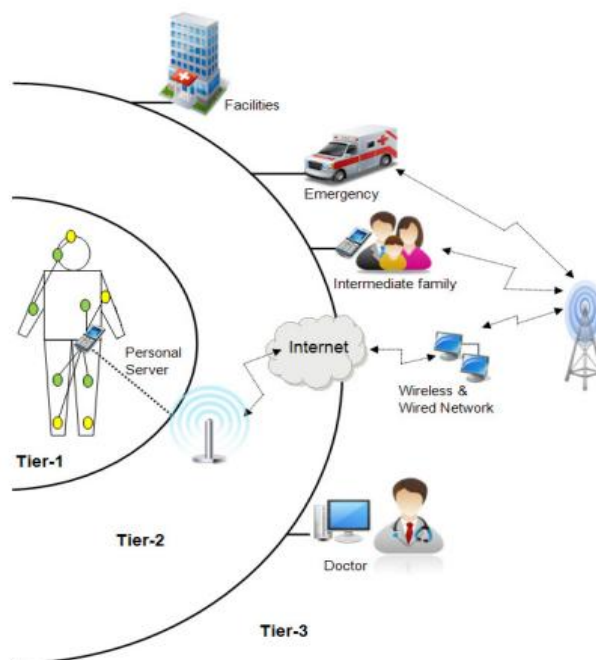
<sup>۳</sup> دانشجوی کارشناسی ارشد مهندسی کامپیوتر، دانشکده برق و کامپیوتر، دانشگاه صنعتی قم، قم

<sup>4</sup> Wireless body area network

در این شبکه‌ها یک ایستگاه پایه وجود دارد که اطلاعات را از سنسورهای موجود جمع‌آوری و برای مراکز راه دور ارسال می‌کند. این تکنولوژی از آخرین تکنولوژی‌های حوزه سلامت و بهداشت است. سنسورهای بسیار کوچک و قابل حمل این شبکه می‌تواند یک یا تعداد بیشتری از علائم را دریافت کنند، آنها را پردازش و ذخیره کنند و در آخر به سایر گره‌های حسگر یا سرورهای دیگر ارسال کنند. این شبکه‌ها علاوه بر نظارت می‌توانند بازخورد مناسبی برای کاربر فراهم کنند که کاربر به وسیله این بازخورد از وضعیت بیماری خود آگاه شود. [۲] استفاده از این شبکه‌ها فرصتی را ایجاد می‌کند تا بتوان مراقبت‌های پزشکی را به خارج از بیمارستان و محیط‌های موردنظر بیماران منتقل کرد که علاوه بر کاهش هزینه‌های پزشکی باعث بهبود کیفیت زندگی و آسایش بیماران می‌شود.

در شکل ۱ طرح کلی این شبکه‌ها را مشاهده می‌کنید. شبکه‌های حسگر بدنی در بسیاری از زمینه‌ها و چالش‌ها با شبکه‌های حسگر بیسیم مشترک هستند اما همان‌طور که در بالا اشاره شد گره‌های حسگر بدنی بسیار کوچک‌تر و با باتری‌های کوچکی هستند که این مسئله در مصرف انرژی، پردازش، ذخیره‌سازی، دقت، گذردهی و تأخیر تأثیر بسیاری می‌گذارد. استاندارد IEEE 802.15.6 آخرین استاندارد بین‌المللی برای شبکه‌های حسگر بیسیم بدنی است. این استاندارد در سال ۲۰۱۲ تکمیل شد. در این استاندارد مواردی از جمله توپولوژی‌های مورد استفاده در این نوع شبکه، لایه‌های مختلف، ساینر گره‌ها و مواردی از قبیل میزان سرعت و توان انتقال بسته‌ها، مدت زمان کاشت هر گره در بدن و غیره عنوان شده است.

یکی از مهم‌ترین مسائل شبکه‌های حسگر بدنی کیفیت سرویس این شبکه‌هاست که شامل موضوعاتی از قبیل انرژی گره‌ها، قابلیت اطمینان و تأخیر موجود در شبکه است. [۳] همان‌طور که قبلاً اشاره شد این گره‌های حسگر به دو صورت پوشیدنی و کاشتنی روی بدن بیمار قرار می‌گیرند. در نوع پوشیدنی به دلیل سهولت در تعویض گره این مشکل قابل حل است و اگر انرژی گره حسگر تمام شود می‌توان گره دیگری را جایگزین کرد. اما در نوع کاشتنی بحث فرق می‌کند. از آنجایی که این شبکه برای راحتی حال بیمار است نمی‌توان در صورت اتمام انرژی در فواصل زمانی کوتاه اقدام به تعویض این گره‌ها کرد. نکته دیگر این است که برخلاف شبکه‌های حسگر بیسیم تعداد گره‌های حسگر قرار داده شده در بدن بیمار محدود است و در صورت اتمام انرژی یک گره حسگر نمی‌توان گره دیگری را جایگزین آن کرد. با توجه به این محدودیت‌ها طبق استاندارد IEEE 802.15.6 حداقل زمان وجود یک گره حسگر کاشته شده در بدن بیمار سه سال می‌باشد. در نتیجه باید تمام عملیاتی که در گره‌ها صورت می‌گیرد به گونه‌ای باشد که کمترین میزان هدررفت انرژی را شاهد باشیم.



شکل ۱: چارچوب کلی شبکه‌های حسگر بیسیم بدن [۱]

این مقاله به این صورت سازماندهی شده است: بخش دوم به مرور کارهای انجام شده جهت کاهش مصرف انرژی سنسورها می‌پردازد. بخش سوم روش پیشنهادی بررسی شده است. بخش چهارم به شبیه سازی و ارزیابی کارایی ایده اختصاص دارد و در بخش چهارم نتیجه گیری بیان می‌شود.

## ۲. پیشینه پژوهش

N. javaid و همکاران پروتکل مسیریابی M-ATTEMPT را برای WBASNs ارائه داده‌اند. این پروتکل از دو نوع مسیریابی مستقیم برای داده‌های بحرانی و مسیریابی چندگانه برای داده‌های معمولی استفاده می‌کند. همچنین روشی ارائه می‌دهد که از تحرک گره‌ها پشتیبانی می‌کند. این روش همچنین یک مدل برنامه ریزی خطی برای استخراج اطلاعات و مصرف انرژی کمتر ارائه می‌دهد. از مهم‌ترین عواملی که باعث ضعف این پروتکل می‌شود این است که انتخاب مسیر بر اساس شمارش تعداد گره‌ها صورت می‌گیرد و فاصله و میزان انرژی گره‌ها تاثیری در انتخاب آن‌ها به عنوان گره بعدی ندارد. مصرف انرژی نامتعادل گره‌ها و تاخیر بسیار زیاد از دیگر معایب این پروتکل به شمار می‌رود. [۴]

A. ahmad و همکاران پروتکلی با نام RE-ATTEMPT ارائه دادند. این پروتکل در واقع بر پایه‌ی پروتکل M-ATTEMPT بود با این تفاوت که برخی مشکلات این پروتکل از قبیل بار غیرمتعارف در گره‌ها، گره‌های با نرخ داده مختلف، در نظر نگرفتن سطح انرژی برای گره‌ها و ... را برطرف می‌کند. انتخاب مسیر بهینه بر اساس انرژی است و فاصله گره‌ها در نظر گرفته نشده است. [۵]

در سال ۲۰۱۵، Neha gupta و همکاران یک الگوریتم مسیریابی برای این شبکه‌ها ارائه داده‌اند. این الگوریتم بر اساس تابع هزینه عمل می‌کند. به این صورت که هرتابع بعد از محاسبه هزینه، گره با کمترین مقدار هزینه را انتخاب می‌کند و آن را به عنوان گره بعدی در مسیریابی انتخاب می‌کند. این کار باعث صرفه‌جویی در مصرف انرژی و افزایش عمر شبکه می‌شود. این شبکه هیچ‌گونه تفاوتی میان بسته‌های عادی و اورژانسی در نظر نگرفته است. [۶]

پروتکل مسیریابی PEA توسط Sadaf Talha ارائه شد. این پروتکل مبتنی بر اولویت بستن عمل می‌کند. گره‌های فرزند یک گره والد متصل به سینک<sup>۱</sup> را بر اساس یک تابع هزینه که وابسته به اولویت، انرژی باقی مانده و فاصله گره است انتخاب می‌کند. انرژی باقی مانده توازن بار را ترجیح می‌دهد یعنی گره‌های مختلف برای انتقال داده انتخاب می‌کند. فاصله در تحویل بسته‌های موفقیت آمیز به گره پدر و مادر کمک می‌کند و برای حالت-های بدنی مناسب است. اولویت کمک می‌کند تا بهترین مسیر ممکن از نظر محدودیت انرژی در WBAN ها انتخاب شود. این روش بسته‌های عادی و اضطراری را اولویت بندی نکرده است. [۷]

در سال ۲۰۱۶ الگوریتم مسیریابی توسط Zhuoming Li و همکارانش ارائه شد. این الگوریتم، مسیریابی EFF را برای تعادل مصرف انرژی در WBAN پیشنهاد می‌کند تا طول عمر شبکه را افزایش دهد. از دو ماتریس برای نگهداری فاصله و انرژی گره‌ها و همچنین وزن هر گره استفاده می‌شود. همچنین برای پیدا کردن کوتاه‌ترین مسیر از الگوریتم دایجسترا<sup>۲</sup> استفاده می‌شود. مشکل اصلی در این الگوریتم در نظر نگرفتن فاصله گره‌ها از یکدیگر در تابع هزینه و همچنین اولویت بندی نکردن گره‌ها است. [۸]

در سال ۲۰۱۷ Lingping و همکاران یک مقاله برای کاهش مصرف انرژی گره‌های حسگر ارائه داده‌اند. در این مقاله پروتکل مسیریابی بر مبنای الگوریتم ژنتیک برای یک شبکه لایه مرزی که در آن شبکه متشکل از چندین ایستگاه است که مسئول دریافت اطلاعات و ارسال اطلاعات به سینک هستند، ارائه شده است. تعداد ایستگاه‌های پایه باید زیاد باشند. از الگوریتم ژنتیک برای حل مسئله بهینه‌سازی و پیدا کردن مشکلات برای استفاده از راه-حل‌های با کیفیت بالا استفاده شده است. [۹]

در سال ۲۰۱۸ پروتکل مسیریابی توسط Rahat Ali Khan و همکارانش ارائه شد. در این مقاله شبکه‌ای قابل اعتماد و کارآمد در رابطه با مصرف انرژی و شبکه با ثبات بالا برای شبکه‌های حسگر بیسیم بدن پیشنهاد شده است. این پروتکل از تابع هزینه برای انتخاب گره فرستنده استفاده می‌کند. در ابتدا مصرف انرژی شبکه‌ها کاهش یافته اما رفته رفته افت انرژی بسیاری را شاهد خواهیم بود [۱۰].

در بسیاری از پروتکل‌ها بسته‌های عادی و اورژانسی اولویت‌بندی نشده‌اند. در صورت مجزا کردن این بسته‌ها می‌توان برای ارسال بسته عادی از مسیریابی استفاده کرد که انرژی کمتری مصرف می‌کنند اما در عین حال ممکن است تاخیر بیشتری داشته باشند و برای بسته‌های اورژانسی از کوتاه-ترین مسیر استفاده کرد. مطالعات انجام شده نشان می‌دهد که هر چه فاصله‌ی گره ارسال‌کننده بسته از گره مقصد بیشتر باشد هنگام ارسال انرژی بیشتری

<sup>1</sup> Sink

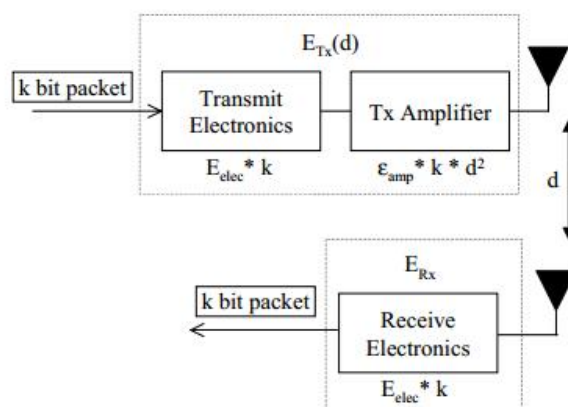
<sup>2</sup> Dijkstra

مصرف می‌شود به همین خاطر گره‌هایی که فاصله بیشتری از گره‌های دیگر دارند مصرف انرژی بیشتری دارند. در گره‌هایی که میزان انرژی آن‌ها به حد پایینی می‌رسد با کوتاه کردن رنج ارسال بسته، گره مجبور به تبادل بسته با نزدیک‌ترین همسایه‌ها می‌شود و به این صورت مصرف انرژی پایین می‌آید.

### ۳. روش پیشنهادی

#### مدل رادیو

مدل‌سازی کانال‌های رادیویی در شبکه‌های حسگر بیسیم بدن از مسائل بسیار مهم در این شبکه‌هاست. از آنجایی که بحث اصلی در این مقاله مسائل مربوط به مسیریابی و یافتن مسیرهای بهینه است، مدل رادیویی را بدون تغییر نسبت به منابع گذشته در نظر گرفته‌ایم. در ادامه مدل رادیویی استفاده شده در این پروتکل را ارائه می‌دهیم. مدل رادیویی استفاده شده در این الگوریتم بر اساس منبع [11] می‌باشد. در این مدل  $d$  فاصله بین فرستنده و گیرنده و  $d^2$  انرژی از دست رفته در طول کانال انتقال می‌باشد. به دلیل هزینه‌ای که ارسال و دریافت هر پیام دارد، هر پروتکل باید سعی کند علاوه بر کاهش فاصله انتقال، از تعداد عملیات‌های ارسال و دریافت برای هر پیام بکاهد. شکل نشان دهنده مدار مدل رادیویی می‌باشد.



شکل ۲: مدل رادیو

مدل رادیویی به صورت زیر در نظر گرفته می‌شود: معادله (۱) انرژی انتقال و معادله (۲) انرژی دریافت است.

$$E_{Tx}(k \times d) = E_{Tx-elec} \times k + E_{amp} \times k \times d^2 \quad \text{رابطه (۱)}$$

$$E_{Rx}(k) = E_{Rx-elec} \times k \quad \text{رابطه (۲)}$$

$E_{Tx}$  انرژی مصرف شده در انتقال،  $E_{Rx}$  انرژی مصرف شده به وسیله دریافت کننده،  $E_{Tx-elec}$  انرژی مورد نیاز برای اجرای مدار الکترونیکی فرستنده،  $E_{Rx-elec}$  انرژی مورد نیاز برای مدار amplifier است،  $K$  سایز بسته و  $n$  ضریب شکست مسیر است.

رابطه (۳) معادله نهایی می‌باشد:

$$E_{Tx}(k \times d) = E_{elec} \times k + E_{amp} \times n \times k \times d^2 \quad \text{رابطه (۳)}$$

پارامترهای موجود در معادله به سخت افزار استفاده شده بستگی دارد. Nordic nRF 2401A یک گیرنده کم قدرت و فرستنده/گیرنده Chipson cc2420، سخت افزارهای مورد استفاده در شبکه‌های بدنی می‌باشند. در این مقاله ما از تراشه Nordic nRF 2401A استفاده کرده‌ایم. جزئیات

تراشه‌ها در جدول ۱۰ ارائه شده است.

جدول ۱۰: پارامترهای رادیویی

Parameters	nRF 2401A	CC2420
DC Current(Tx)	10.5	17.4
DC Current(Rx)	18	19.7
Supply Voltage(min)	1.9	2.1
E <sub>tx-elec</sub>	16.7	96.9
E <sub>rx-elec</sub>	36.1	172.8
E <sub>amp</sub>	1.9e-9	2.71e-7

#### مدل مسیر از دست رفته

از دست رفتن مسیر (یا ریزش مسیر)<sup>۱</sup>، کاهش تراکم قدرت موج الکترومغناطیسی است که از طریق فضا منتشر می‌شود. از دست دادن مسیر جزء اصلی در تجزیه و تحلیل لینک یک سیستم مخابراتی است. از دست رفتن مسیر به علت افزایش سطح پوشش منطقه پخش می‌شود. آنتن فرستنده نیروی بیرون را منتشر می‌کند و هر جسم بین فرستنده و گیرنده باعث تخریب سیگنال اشباع شده می‌شود. در شبکه‌های بدنی، موقعیت‌های مختلف انسان، حرکت بدن، دست‌ها و لباس‌ها بر سیگنال منتقل شده تأثیر می‌گذارد. Path Loss به فاصله و فرکانس بستگی دارد و به صورت زیر بیان می‌شود:

$$PL(f \times d) = PL(f) \times PL(d)$$

رابطه فرکانس با مسیر از دست رفته به صورت زیر می‌باشد:

$$\sqrt{PL(f)} \propto f^k$$

K وابسته به فرکانس است و هندسه بدن بر روی آن تأثیر می‌گذارد. رابطه فاصله با مسیر از دست رفته به صورت زیر می‌باشد:

$$PL(f \times d) = PL_0 + 10n \log_{10} \frac{d}{d_0} + X_g$$

PL قدرت سیگنال دریافتی، d فاصله بین فرستنده و گیرنده، d<sub>0</sub> فاصله مرجع، n ضریب شکست مسیر می‌باشد و مقدار آن بستگی به پخش سیگنال در محیط دارد. این مقدار در فضای آزاد ۲ می‌باشد. در شبکه‌های حسگر بدن برای ارتباط خطی بین ۳-۴، و برای ارتباط غیرخطی بین ۵-۴.۷ است. X متغیر تصادفی گوسی و σ انحراف استاندارد است. PL<sub>0</sub> قدرت سیگنال دریافتی از مرجع d<sub>0</sub> می‌باشد که به صورت رابطه (۴) ارائه می‌شود.

$$PL_0 = 10 \log \frac{(4\pi \times d_0 \times f)^2}{c} \quad \text{رابطه ۴}$$

که f نشان دهنده فرکانس، c سرعت نور و d فاصله بین فرستنده و گیرنده می‌باشد.

#### الگوریتم فلویید-وارشال

الگوریتم فلویید-وارشال یک الگوریتم تحلیل گراف برای پیدا کردن کوتاه‌ترین مسیر در یک گراف وزن‌دار می‌باشد. با یک بار اجرای این الگوریتم کوتاه‌ترین مسیر بین همه جفت راس‌ها پیدا خواهد شد. در این الگوریتم، ابتدا ماتریس مجاورت برای نقاط گراف نوشته شده و در مرحله بعد با استفاده

<sup>1</sup> Path loss

از یک راس واسطه، کوتاه‌ترین فاصله بین نقاط را محاسبه کرده و ماتریس را با مقادیر جدید بازنویسی می‌کند. پس از آن دو نقطه به عنوان واسطه انتخاب شده و ماتریس جدید به دست می‌آید. با تکرار این روند الگوریتم به پایان رسیده و در نهایت ماتریسی ایجاد شده که کوتاه‌ترین مسیر بین تمامی نقاط را محاسبه کرده‌است. بدیهی است که کوتاه‌ترین مسیر بین مبدأ و مقصد را می‌توان به راحتی از ماتریس تشکیل شده استخراج نمود. الگوریتم وارشل همه مسیرهای ممکن در یک گراف، بین هر جفت از راس‌ها را مقایسه می‌کند. این الگوریتم قادر است این کار را تنها با مقایسه انجام دهد. این ملاحظه قابل توجهی می‌باشد که در یک گراف یال وجود داشته باشد و هر ترکیبی از یال‌ها چک شده باشد. یک با راس‌هایی که  $i$  از  $1$  تا  $N$  می‌باشد را در نظر بگیرید. علاوه بر این یک تابع به نام  $shortestPath(i,j,k)$  را در نظر بگیرید که کوتاه‌ترین مسیر ممکن از  $i$  تا  $j$  را با استفاده از راس‌های  $1$  تا  $k$  که به عنوان راس‌های میانی در امتداد مسیر می‌باشند را برمی‌گرداند. هدف ما پیدا کردن کوتاه‌ترین مسیر از هر  $i$  تا هر  $j$  تنها با استفاده از راسهای  $1$  تا  $k+1$  می‌باشد و کاندید برای این مسیر وجود دارد:

۱- کوتاه‌ترین مسیری که فقط از راس‌های موجود در مجموعه  $\{1, \dots, k\}$  استفاده می‌کند.

۲- تعدادی مسیر که از  $i$  تا  $k+1$  و سپس از  $k+1$  تا  $j$  می‌روند وجود دارد که این مسیر بهتر می‌باشد.

در الگوریتم‌های گذشته از جمله  $[8]$  برای یافتن کوتاه‌ترین مسیر از الگوریتم دایجسترا استفاده شده است. الگوریتم دایجسترا روشی برای محاسبه کوتاه‌ترین مسیر از مبدأ ثابت می‌باشد، اما الگوریتم فلوید-وارشل برای محاسبه کوتاه‌ترین مسیر بین هر دو جفت گره در گراف وزن‌دار مورد استفاده قرار می‌گیرد. الگوریتم فلوید-وارشل به نسبت الگوریتم دایجسترا دارای مزیت‌هایی می‌باشد از جمله اینکه، پیاده‌سازی ساده‌تری دارد و در حالت کلی مرتبه زمانی بهتری نیز نسبت به الگوریتم‌هایی مانند بلمن-فورد دارد. با توجه به دلایل ذکر شده و مزیت‌های الگوریتم فلوید-وارشل از این الگوریتم در طراحی روش پیشنهادی استفاده شده است.

### جزئیات روش پیشنهادی

#### ۱. فاز شروع

- بسته سلام

در ابتدا گره سینک بسته سلامی<sup>۱</sup> حاوی موقعیت سینک و اطلاعات آن ارسال می‌کند. همان‌طور که در شکل ۰ مشاهده می‌کنید این بسته حاوی اطلاعاتی در مورد محل سینک، آی دی سینک، انرژی باقیمانده گره می‌باشد. هر گره که این بسته را دریافت می‌کند موقعیت سینک را ذخیره می‌کند و اطلاعات خود را جایگزین کرده و دوباره ارسال می‌کند.

$ID_s$	$L_s$	$ID_j$	$L_j$	$D_{(j,s)}$	$E_j$
--------	-------	--------	-------	-------------	-------

شکل ۳۰: بسته سلام

همان‌طور که در شکل ۰ می‌بینید، اگر بسته سلام از طرف سینک ارسال شود، شناسه سینک و گره در بسته یکسان خواهد بود که نشان‌دهنده گره سینک می‌باشد. همچنین فاصله مقدار صفر و فیلد انرژی نشان دهنده انرژی گره سینک می‌باشد. هر گره با دریافت این بسته اطلاعات سینک را ذخیره می‌کند و بسته را به روز می‌کند. بسته‌ای که گره ارسال می‌کند حاوی شناسه و محل سینک، شناسه و محل گره، فاصله گره تا سینک و انرژی باقیمانده گره ارسال‌کننده می‌باشد. این بسته‌ها به صورت دوره‌ای در شبکه پخش می‌شوند و گره‌ها از موقعیت و اطلاعات سینک و گره‌های دیگر آگاه می‌شوند.

- جدول همسایگی

هر گره بعد از دریافت بسته سلام اطلاعات آن را بررسی می‌کند. اگر گره بتواند به عنوان گره میانی تا سینک در نظر گرفته شود اطلاعات آن در جدول همسایگی گره ذخیره می‌شود. اطلاعات جدول همسایگی برای هر گره در جدول ۲ آمده است.

<sup>1</sup> Hello packet

جدول ۲: جدول همسایگی گره

ID <sub>DST</sub>	ID <sub>J</sub>	L <sub>j</sub>	D (j, DST)	E <sub>j</sub>
-------------------	-----------------	----------------	------------	----------------

هر گره فاصله خود تا گره‌های دیگر و همچنین فاصله تا سینک را با استفاده از رابطه (۵) محاسبه می‌کند.

$$\text{distance}(i:j) = \sqrt{(x_i - x_j)^2 + (y_i - y_j)^2} \quad \text{رابطه (۵)}$$

## ۲. فاز مسیریابی

در این فاز ابتدا گره‌ها به دو دسته عادی و اضطراری تقسیم می‌شوند.

- گره‌هایی که داده اضطراری تولید می‌کنند:

با توجه به اینکه بسته‌های گره‌های اضطراری باید بدون تاخیر به سینک برسند، این گره‌ها بدون درگیر شدن در محاسبات یافتن مسیر، بسته‌های خود را به سینک ارسال می‌کنند. از آنجا که ارسال مستقیم داده به سینک نیازمند مصرف انرژی بیشتری می‌باشد، اگر انرژی این گره‌ها به حد پایینی برسد ممکن است بسته به وسیله سینک دریافت نشود. بخش مهمی از الگوریتم که کوتاه‌تر کردن رنج ارسال بسته می‌باشد، در این قسمت صورت می‌گیرد. در این‌جا وقتی انرژی گره کمتر از حد آستانه می‌شود بسته به یکی از نزدیک‌ترین همسایه‌ها تحویل داده می‌شود. این مسئله باعث می‌شود که در پایین‌ترین حد انرژی نیز بسته‌ای در شبکه از بین نرود.

- گره‌هایی که داده عادی تولید می‌کنند:

برای گره‌های عادی الگوریتم به شیوه دیگری صورت می‌گیرد. ما تابع هزینه‌ای تعریف کرده‌ایم که از طریق آن برای هر گره وزن مشخصی در نظر گرفته می‌شود. این وزن هم انرژی باقیمانده گره و هم فاصله گره‌ها از یکدیگر را در نظر می‌گیرد. مراحل ارسال بسته‌های عادی به صورت زیر می‌باشد:

۱. محاسبه گراف W که شامل هزینه‌های هر مسیر می‌باشد با استفاده از رابطه (۶)

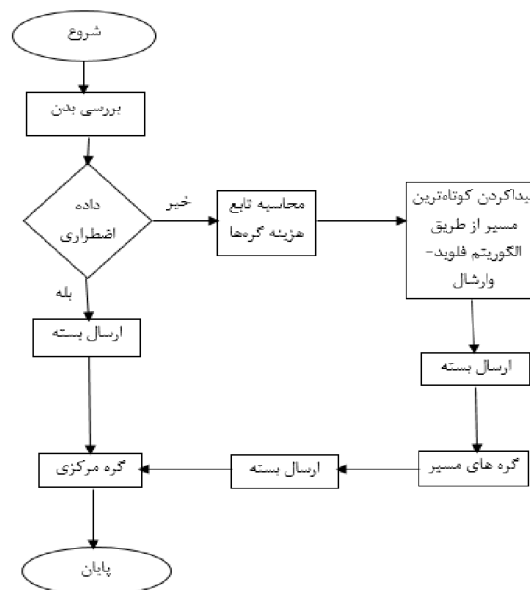
$$\text{cost\_function}(i:j) = \frac{\text{distance}(i:j)}{E_i} \quad \text{رابطه (۶)}$$

که  $\text{distance}(i:j)$  نشان دهنده فاصله دو گره حسگر  $i$  و  $j$  است.  $E_i$  نشان دهنده میزان انرژی باقیمانده گره فرستنده است. مقداری که تابع هزینه محاسبه می‌کند در واقع به عنوان وزن هر گره در نظر گرفته می‌شود.

۲. به دست آوردن مسیر بهینه در گراف W با استفاده از الگوریتم فلوید-وارشال

۳. ارسال داده به سینک از مسیرهای بهینه به دست آمده

نمودار روند مسیریابی الگوریتم پیشنهادی در شکل ۴ نشان داده شده است. همان‌طور که در شکل مشاهده می‌کنید ابتدا اسکن کلی بدن صورت می‌گیرد و گره‌ها به دو دسته عادی و اضطراری تقسیم می‌شوند. گره‌های اضطراری به دلیل اهمیت بالای بسته‌ها از طریق مسیر مستقیم اقدام به ارسال بسته‌های خود به ایستگاه پایه می‌کنند. برای گره‌های عادی به شکل دیگری عمل می‌شود. ابتدا هزینه هر مسیر بر اساس فاصله و انرژی باقیمانده محاسبه می‌شود. با استفاده از الگوریتم فلوید-وارشال کم هزینه‌ترین مسیر پیدا می‌شود. در نهایت گره از مسیر پیدا شده بسته خود را به گره مرکزی ارسال می‌کند.



شکل ۴: نمودار روند مسیریابی

#### ۴. فاز زمانبندی

بعد از انتخاب مسیر برای ارسال داده به سینک مرحله دیگر ارسال داده، زمانبندی گره‌ها است. گره سینک دسترسی چندگانه بخش زمانی<sup>۱</sup> را برای ارتباط بین گره‌ها با سینک ایجاد می‌کند. این برنامه به گره‌های شبکه اسلات‌های زمانی اختصاص می‌دهد که هر گره در زمان خودش با گره سینک ارتباط برقرار کند. گره‌ها برای ارسال داده‌های عادی خود در این بازه‌های زمانی داده ارسال می‌کنند. و در صورت اضطراری بودن داده‌ها، قبل از شروع اسلات زمانی بسته خود را ارسال می‌کنند.

#### ۵. شبیه‌سازی و ارزیابی نتایج

در این بخش روش پیشنهادی خود را با نرم افزار متلب ارزیابی کرده و برای اندازه‌گیری کارایی روش پیشنهادی خود از مهم‌ترین پارامترهای مسیریابی مانند طول عمر شبکه، پایداری شبکه، انرژی باقیمانده و... استفاده می‌کنیم. برای نشان دادن قابلیت روش پیشنهادی آن را با روش M-Attempt که در منبع [۴] آورده شده مقایسه می‌کنیم. ابتدا روش M-Attempt را با نرم افزار متلب ارزیابی کرده و نتایج دقیق آن را بر اساس منبع اصلی این پروتکل به دست آورده‌ایم. در ادامه با پیاده‌سازی الگوریتم پیشنهادی خروجی‌های به دست آمده را با این روش مقایسه می‌کنیم و نتایج نهایی را ارائه می‌دهیم.

##### پارامترهای ارزیابی

در این بخش مهم‌ترین پارامترها برای ارزیابی روش ارائه شده با پروتکل M-Attempt شرح داده می‌شوند.

- طول عمر شبکه: این پارامتر نشان‌دهنده کل زمانی است که شبکه زنده است. از آغاز ارسال بسته‌ها به سینک تا زمان تمام شدن انرژی آخرین گره محاسبه می‌شود.
- انرژی باقیمانده: میزان انرژی باقیمانده گره در هر دور محاسبه می‌شود.
- مسیر از دست رفته: مسیر از دست رفته، تفاوت بین قدرت سیگنال منتقل شده و قدرت سیگنال دریافت شده است. مسیر از دست رفته در دسی بل اندازه گیری می‌شود.

<sup>۱</sup> TDMA



- پایداری شبکه: دوره پایداری به مدت زمانی گفته می‌شود که از ابتدای ارسال بسته‌ها تا زمان تمام شدن انرژی اولین گره (مرکز اولین گره) محاسبه می‌شود.
- میزان گذردهی: تعداد بسته‌هایی که موفق می‌شوند به سینک برسند.

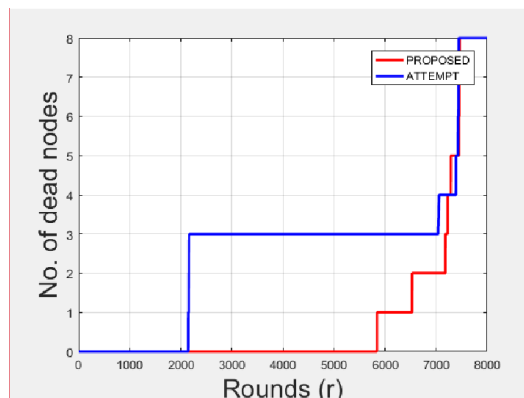
#### محیط شبیه سازی و طراحی سناریو

مطالعات انجام شده نشان می‌دهد که معتبرترین مقالات ارائه شده در این زمینه برای ارزیابی الگوریتم‌های خود از نرم افزار متلب استفاده کرده‌اند. همچنین از آنجایی که روش انتخاب شده جهت مقایسه با روش پیشنهادی نیز با نرم افزار متلب شبیه سازی شده است در این مقاله نیز از نرم افزار متلب برای ارزیابی کارایی استفاده می‌شود. این نرم افزار برای به دست آوردن نتایج نهایی در زمینه انرژی مصرفی گره‌ها دقیق ترین نتایج را ارائه می‌دهد. ۹ گره در محل‌های مشخص شده در جدول ۳ قرار گرفته اند. برنامه در ۸۰۰۰ دور اجرا می‌شود.

جدول ۳: محل قرارگیری سنسورها در بدن

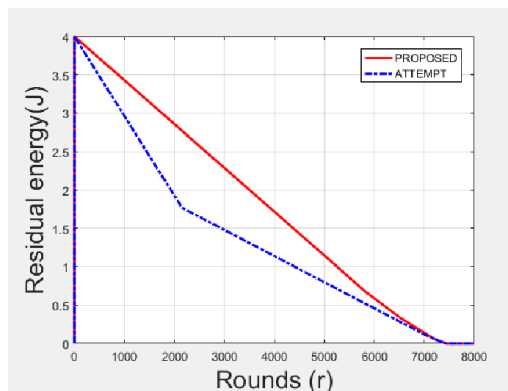
گره‌ها	X(m)	Y(m)
گره ۱	۰/۳	۰/۱
گره ۲	۰/۵	۰/۳
گره ۳	۰/۳	۰/۵۵
گره ۴	۰/۵	۰/۵۵
گره ۵	۰/۷	۰/۸
گره ۶	۰/۱	۰/۸
گره ۷	۰/۳۷	۰/۷۵
گره ۸	۰/۴۵	۰/۹
گره ۹ (مرکزی)	۰/۲۵	۱

- طول عمر شبکه: شکل ۵ طول عمر شبکه در طرح پیشنهادی را نشان می‌دهد. انتخاب مسیرهای بهینه با استفاده از الگوریتم کوتاه‌ترین مسیر فلوید-وارشال نقش مهمی در تعادل انرژی بین گره‌های حسگر ایفا می‌کند. همان‌طور که در جزئیات الگوریتم توضیح داده شد، بسته‌ها به دو دسته عادی و اورژانسی تقسیم شده‌اند. گره‌هایی که بسته‌های اورژانسی جمع‌آوری می‌کنند، بسته‌های خود را به صورت مستقیم به سینک ارسال می‌کنند. بقیه گره‌ها با استفاده از این الگوریتم در هر دور با توجه به میزان انرژی باقیمانده گره‌ها و فاصله آنها تا سینک بهینه‌ترین مسیر را برای انتخاب بسته خود انتخاب می‌کنند. همان‌طور که مشاهده می‌کنید در روش پیشنهادی اولین گره شبکه بعد از ۶۰۰۰ دور می‌میرد که نشان دهنده طول عمر بسیار بالای شبکه است.

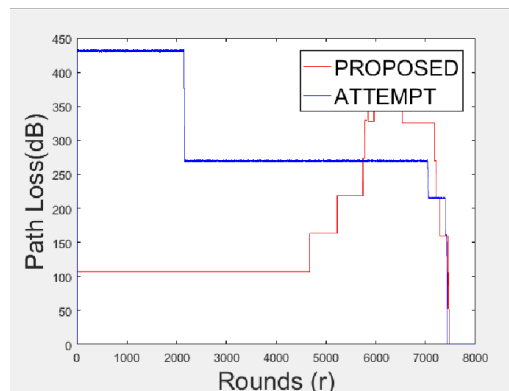


شکل ۵: بررسی طول عمر شبکه

- انرژی باقیمانده: میزان انرژی باقیمانده شبکه در هر دور اندازه گیری شده و در شکل ۶ مشاهده می کنید. مدل پیشنهادی با اولویت بندی بسته های ارسالی در هر دور موجب صرفه جویی در انرژی مصرفی گره ها می شود. در این روش هر بار بهینه ترین مسیرها تا سینک انتخاب می شود که این کار بر اساس انرژی باقیمانده سنسورها و فاصله آن ها تا سینک انجام می شود. نتایج شبیه سازی نشان می دهد که این روش حداقل انرژی را تا ۷۰ درصد شبیه سازی مصرف می کند. این باعث می شد که گره های بیشتری برای سینک ارسال می شوند.
- مسیر از دست رفته: شکل ۷ مسیرهای از دست رفته سنسورهای مختلف را نشان می دهد. از دست رفتن مسیر، عملکرد فرکانس و فاصله است. این محاسبه از فاصله گره تا سینک با فرکانس ثابت ۲٫۴ GHz محاسبه می شود. توپولوژی پیشنهادی چند-هاپ باعث کاهش فاصله و کاهش مسیر از دست رفته می شود. همانطور که مشاهده می کنید در ابتدا پروتکل پیشنهادی به خوبی انجام می شود. با این حال، پس از ۲۰۰۰ دور، از دست دادن مسیر M-Attempt به طور چشمگیری کاهش می یابد، زیرا برخی از گره های توپولوژی M-Attempt می میرند. پروتکل پیشنهادی ما دارای دوره ثبات بیشتر و گره های زنده تر است.

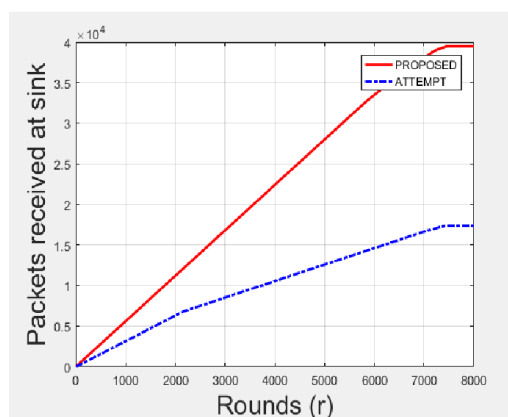


شکل ۶: بررسی انرژی باقیمانده شبکه



شکل ۷: مسیر از دست رفته شبکه

- بسته‌های دریافتی سینک: گذردهی شبکه میزان بسته‌هایی است که به طور موفقیت‌آمیز به سینک تحویل داده شده‌اند. کاربرد شبکه‌های حسگر بیسیم بدن انتقال اطلاعات حیاتی بیماران به پزشک یا ایستگاه پرستاری است. به همین دلیل تعداد بسته‌های ارسالی به سینک و تعداد بسته‌هایی که در بین مسیر از دست می‌روند از موارد مهم این شبکه‌ها به شمار می‌رود. همان‌طور که در شکل ۸ مشاهده می‌کنید، در پروتکل پیشنهادی تعداد بسته‌هایی که به صورت موفقیت‌آمیز به سینک تحویل داده می‌شوند نسبت به روش M-Attempt بسیار بهبود یافته است. وجود گره‌های زنده بیشتر باعث انتقال بسته‌های بیشتر به سینک می‌شود.



شکل ۸: بررسی گذردهی شبکه

ابتدا تک تک نمودارهای به دست آمده را ارزیابی کرده و میزان بهبود روش پیشنهادی را در موارد ذکر شده با روش M-Attempt را به دست می‌آوریم. در نهایت میانگین بهبود روش پیشنهادی را محاسبه می‌کنیم. روش پیشنهادی نسبت به روش M-Attempt حدود ۲۲ درصد بهبود داشته است.

## ۶. نتیجه گیری و پیشنهاد

در این مقاله، یک الگوریتم پیدا کردن بهینه‌ترین مسیر برای ارسال بسته‌ها به سینک بر اساس الگوریتم کوتاه‌ترین مسیر فلوید-وارشال ارائه داده‌ایم. گرافی که در این الگوریتم در نظر گرفته شده بر اساس انرژی باقیمانده گره‌ها و فاصله آن‌ها تا سینک به دست آمده است. ابتدا با استفاده از تابع هزینه مقدار متناسب با هر گره محاسبه شده و در گراف قرار می‌گیرد. سپس با استفاده از الگوریتم فلوید-وارشال بهینه‌ترین مسیر از هر گره تا سینک محاسبه می‌شود. گره‌هایی که بسته‌های عادی جمع‌آوری می‌کنند از طریق مسیرهای بهینه برای ارسال بسته‌های خود به سینک اقدام می‌کنند. گره‌هایی که بسته‌های اورژانسی جمع‌آوری می‌کنند، بسته‌های خود را به طور مستقیم به سینک ارسال می‌کنند. هنگامی که انرژی گره‌ای به مقداری کمتر از حد آستانه برسد رنج ارسالی گره کوتاه می‌شود و بسته‌های جمع‌آوری شده را به نزدیک‌ترین همسایه تحویل می‌دهد، که این کار باعث می‌شود هیچ بسته‌ای در

شبکه از بین نرود. استفاده از تابع هزینه و همچنین الگوریتم کوتاه‌ترین مسیر فلویید-وارشال باعث بهبود نتایج روش پیشنهادی در مقایسه با سایر روش‌های ارائه شده می‌شود. نتایج شبیه‌سازی نشان می‌دهند که طرح مسیریابی پیشنهادی باعث افزایش طول عمر شبکه، همچنین کاهش انرژی مصرفی گره‌های شبکه می‌شود. در زمینه شبکه‌های حسگر بیسیم بدنی بستر مناسبی برای تحقیق و پژوهش فراهم است. این شبکه‌ها دارای چالش‌های بسیار زیادی در حوزه‌های مختلف می‌باشند. پروتکل‌های مختلفی ارائه شده است که هر کدام بر ویژگی خاصی از جمله بهبود انرژی، بهبود قابلیت اطمینان، بهبود تأخیر شبکه، امنیت شبکه، مسیریابی‌های مبتنی بر دما و .... متمرکز شده‌اند.

#### ۷. منابع

- [1] S. Movassaghi, M. Abolhasan, J. Lipman, D. Smith, and A. Jamalipour, "Wireless Body Area Networks: A Survey," *IEEE COMMUNICATIONS SURVEYS & TUTORIALS, ACCEPTED FOR PUBLICATION*, 2013.
- [2] F. T. Zuhra, K. A. Bakar, A. Ahmed, and M. A. Tunio, "Routing protocols in wireless body sensor networks: A comprehensive survey," *Journal of Network and Computer Applications*, vol. 99, pp. 73-97, 2017/12/01/ 2017.
- [3] V. Bhanumathi and C. P. Sangeetha, "A guide for the selection of routing protocols in WBAN for healthcare applications," *Human-centric Computing and Information Sciences*, journal article vol. 7, no. 1, p. 24, August 10 2017.
- [4] N. Javaid, Z. Abbas, M. S. Fareed, Z. A. Khan, and N. Alrajeh, "M-ATTEMPT: A New Energy-Efficient Routing Protocol for Wireless Body Area Sensor Networks," *Procedia Computer Science*, vol. 19, pp. 224-231, 2013/01/01/ 2013.
- [5] A. Ahmad, N. Javaid, U. Qasim, M. Ishfaq, Z. A. Khan, and T. A. Alghamdi, "RE-ATTEMPT: A New Energy-Efficient Routing Protocol for Wireless Body Area Sensor Networks," *International Journal of Distributed Sensor Networks*, vol. 10, no. 4, p. 464010, 2014.
- [6] N. Gupta and B. S. Sidhu, "Cost Based Energy Efficient Routing Algorithm for Wireless Body Area Networks," *JCSE International Journal of Computer Sciences and Engineering*, vol. 3, no. 8, 2015.
- [7] S. Talha, R. Ahmad, and A. K. Kiani, "Priority Based Energy Aware (PEA) Routing Protocol for WBANs," in *2015 IEEE 82nd Vehicular Technology Conference (VTC2015-Fall)*, 2015, pp. 1-5.
- [8] Z. Li, Z. Xu, S. Mao, X. Tong, and X. Sha, "Weighted Energy-Balanced Efficient Routing Algorithm for Wireless Body Area Network," *International Journal of Distributed Sensor Networks*, vol. 12, no. 2, p. 7364910, 2016.
- [9] L. Kong, J.-S. Pan, V. Snášel, P.-W. Tsai, and T.-W. Sung, "An energy-aware routing protocol for wireless sensor network based on genetic algorithm," *Telecommunication Systems*, journal article vol. 67, no. 3, pp. 451-463, March 01 2018.
- [10] R. A. Khan et al., "An Energy Efficient Routing Protocol for Wireless Body Area Sensor Networks," *Wireless Personal Communications*, journal article vol. 99, no. 4, pp. 1443-1454, April 01 2018.
- [11] W. R. Heinzelman, A. Chandrakasan, and H. Balakrishnan, "Energy-efficient communication protocol for wireless microsensor networks," in *Proceedings of the 33rd Annual Hawaii International Conference on System Sciences*, 2000, p. 10 pp. vol.2.