# یک الگوریتم مسیریابیِ چندمسیریِ پیشدستانه با مسیرهای مجزا برای شبکه‌های حسگر بی‌سیم

نستوه طاهری جوان
دانشگاه صنعتی امیرکبیر(پلی تکنیک تهران)
دانشکده مهندسی کامپیوتر و فنآوری اطلاعات
آزمایشگاه شبکه های سیار Ad-Hoc
nastooh@aut.ac.ir

آرش نصیری اقبالی
دانشگاه صنعتی امیرکبیر(پلی تکنیک تهران)
دانشکده مهندسی کامپیوتر و فنآوری اطلاعات
آزمایشگاه شبکه های سیار Ad-Hoc
eghbali@aut.ac.ir

مهدی دهقان
دانشگاه صنعتی امیرکبیر(پلی تکنیک تهران)
دانشکده مهندسی کامپیوتر و فنآوری اطلاعات
آزمایشگاه شبکه های سیار Ad-Hoc
dehghan@aut.ac.ir

**چکیده:** یکی از مسائل مهم و چالش برانگیز در شبکه‌های حسگر مسالهٔ انرژی و دورهٔ زندگی گره‌ها در شبکه است. برای افزایش طول عمر گره‌ها می‌توان از روش‌های متفاوتی استفاده کرد که یکی از این روش‌ها توزیع بار هنگام انتقال داده‌ها در بین گره‌های شبکه است. برای این منظور می‌توان از روش‌های مسیریابی چندمسیره استفاده کرد. از طرفی، الگوریتم مسیریابی هدایت شده، که یک الگوریتم داده محور است، یکی از روشهای مطرح در شبکه‌های حسگر می‌باشد. در الگوریتم انتشار هدایت شده اطلاعات مسیریابی به صورت محلی در داخل گره‌های شبکه ذخیره می‌شوند؛ بنابراین در این روش، اطلاعات سراسری در مورد مسیر وجود ندارد. همین امر باعث می‌شود تشکیل مسیرهای چندگانهٔ مناسب بین گره‌های مبدا و مقصد، نسبتاً پیچیده و دشوار باشد.

در این مقاله یک روش، جهت چند مسیره کردن الگوریتم انتشار هدایت شده به روش پیشدستانه پیشنهاد و بررسی شده است. همچنین روشی برای متوازن کردن بار بین گره‌های مبدا و مقصد، از طریق توزیع ترافیک داده‌های منتقل شده بین گره مبدا و مقصد به صورت غیر یکنواخت، پیشنهاد شده است. در پایان نتایج حاصل از شبیه‌سازی الگوریتم پیشنهادی جهت مقایسه با الگوریتم‌های موجود ارائه شده‌است که این نتایج بهبودهای قابل توجهی را در زمینهٔ افزایش طول عمر گره-ها و طول زمان اتصال‌ها و کاهش نرخ از بین رفتن بسته‌ها نشان می-دهند.

**واژه های کلیدی:** شبکه‌های حسگر بی‌سیم، روش انتشار هدایت شده، مسیریابی چندمسیری، مسیریابی پیشدستانه، توزیع بار، توازن مصرف انرژی.

## ۱- مقدمه

در سال‌های اخیر، رشد بسیاری را در زمینه شبکه‌های حسگر[۱]، شاهد بوده‌ایم. شبکه‌های حسگر، از تعداد زیادی حسگر بسیار کوچک تشکیل شده‌اند که برای جمع آوری و پردازش اطلاعات محیطی استفاده می-شوند. بر خلاف شبکه‌های موردی[۲]، که در نگاه اول بسیار شبیه به شبکه‌های حسگر به نظر می‌آیند، گره‌ها در شبکه‌های حسگر معمولاً فاقد آدرس‌های منحصر بفرد می‌باشند و آنچه بیشتر در این شبکه‌ها حائز اهمیت است، اطلاعات جمع‌آوری شده توسط حسگرهای شبکه است[1]. ازطرفی به دلیل عدم دسترسی به گره‌ها پس از فرآیند پراکندن آنها در محیط، گره‌های شبکه پس از مصرف انرژی موجود، عملاً بلااستفاده شده و خواهند مُرد. بنابراین مساله انرژی و بهینه‌سازی مصرف آن، یکی از چالش‌های بسیارمهم در این شبکه‌ها می‌باشد و تحقیقات زیادی هم در سال‌های اخیر پیرامون این مورد صورت گرفته است.

یکی از الگوریتم‌های مناسب مطرح شده برای مسیریابیِ داده محور در شبکه‌های حسگر، روش انتشار هدایت شده[۳](DD) است[2] که در آن، گره‌های شبکه تنها از داده‌های محلی جهت مسیریابی بسته‌ها استفاده می‌کنند. در این روش درخواست‌ها به صورت بسته‌های علاقه‌مندی[۴]، توسط گره‌های اصلی در سطح شبکه پراکنده می‌شوند و به تمام گره‌های شبکه می‌رسند. سپس گره‌هایی که شامل داده‌های مورد نظر (منابع اطلاعات) هستند، با دریافت بسته علاقه‌مندی، اطلاعات جمع‌آوری شده را به سمت گره مقصد[۵] هدایت می‌کنند.

در الگوریتم DD همیشه جهت ارسال اطلاعات، کوتاه‌ترین مسیر بین گره مبدا و مقصد انتخاب می‌شود که این امر باعث می‌شود انرژی گره‌های مسیر انتخاب شده به سرعت تخلیه شود، خصوصاً در شرایطی که شبکه ما دارای مقیاس بزرگی باشد و نرخ داده‌های ارسالی از یک ناحیهٔ مشخص نسبتاً بالا باشد؛ که در شبکه‌های حسگر این شرایط بسیار محتمل است. نکته منفی دیگری که این مشکل را تشدید می‌کند اینست که در صورت تخلیه شدن یک مسیر، غالباً کوتاه‌ترین مسیر بعدی که معمولاً مسیر مجاور این مسیر است، انتخاب خواهد شد که این امر به مرور زمان، خصوصاً در هنگامی که فاصله بین گره مبدا و مقصد زیاد باشد، می‌تواند باعث جدا شدن قسمت‌های مختلف شبکه گردد. پس ما نیاز به روشی داریم که به صورت عادلانه‌تری بتواند ترافیک داده‌های منتقل شده بین گره‌های مبدا و مقصد را میان گره‌های مسیر توزیع کند.

یکی از روش‌های معمول جهت توزیع ترافیک در شبکه‌های مبتنی بر IP مانند شبکه‌های موردی، ایجاد مسیرهای چندگانه بین گره مبدا و مقصد می‌باشد؛ اما در این شبکه‌ها، بر خلاف شبکه‌های حسگر، مسأله انرژی خیلی بحرانی نیست و از سربار ایجاد شده برای تشکیل مسیرهای چندگانه به راحتی می‌توان صرف نظر کرد. اما این گونه روشها به دلیل سربار زیاد، اغلب در شبکه‌های حسگر قابل استفاده نیستند. از طرف دیگر از آنجایی که الگوریتم DD یک روش مسیریابی محلی است و گره‌های شبکه در این روش اطلاعات کلی مسیر را در اختیار ندارند، تشکیل مسیرهای چندگانه که دارای تعداد گام مناسبی باشند، در این الگوریتم کار نسبتاً دشواری است.

در روش پیشنهادی در این مقاله، برای متعادل کردن بار بین گره‌های شبکه، از ایدهٔ مسیریابی چندمسیری بر اساس روش DD استفاده می‌کنیم و با استفاده از روش‌های پیشنهاد شده بین گره‌های مبدا و مقصد چندین مسیر مجزا[6] تشکیل می‌دهیم. برای این منظور یک روش جهت نیل به مسیریابی چندمسیریِ پیشدستانه[7] با عنوان مسیریابیِ چندمسیریِ پیشدستانهٔ مجزا پیشنهاد می‌شود.

ادامهٔ این مقاله از بخش‌های زیر تشکیل شده‌است. در بخش ۲ به مرور کارهای مرتبط می‌پردازیم و در بخش ۳، الگوریتم پیشنهادی و روش‌های بهبود آن را بررسی می‌کنیم. در بخش ۴، الگوریتمی جهت تقسیم بسته‌های ارسالی، بین این چند مسیر ارائه شده‌است. در بخش ۵ نیز الگوریتم‌های پیشنهادی با الگوریتمهای موجود مقایسه شده‌اند و نتایج حاصل از شبیه سازی آنها ارائه شده‌است. در نهایت در بخش۶ نتیجه‌گیری و پیشنهاد کارهای آتی آورده شده‌است.

## ۲- کارهای مرتبط

الگوریتم انتشار هدایت شده یکی از پرکاربردترین و محبوب‌ترین روش‌های مسیریابی برای شبکه‌های حسگر بی‌سیم می‌باشد، به دلیل همین عمومیت، روشهای گوناگونی جهت بهبود عملکرد این الگوریتم ارائه شده اند که می‌توان از میان آنها به روش انتشار بیرون دهنده برای کاربردهایی که در آنها تعداد گیرنده‌ها زیاد است و داده‌های تولید شده نیز حجم بالایی ندارد، اشاره کرد یا روش انتشار جذب یک مرحله‌ای (در مقابل روش اصلی که جذب دو مرحله‌ای هم نامیده می‌شود) که در این روش، منابع پس از دریافت علاقه‌مندی منطبق با داده‌هایشان، مستقیماً پیغام‌های داده را به سمت گیرنده ارسال می‌کنند. همچنین روشهایی برای تقسیم کردن شبکه به خوشه‌های کوچکتر پیشنهاد شده است مانند روش LEACH که یک روش سلسله مراتبی فعال است ولی از روش انتشار هدایت شده بهره نمی‌برد[3].

در این روش برای صرفه‌جویی در مصرف انرژی و جلوگیری از خالی شدن سریع باتری گره‌هایی که به عنوان سرخوشه انتخاب می‌شوند، از الگوریتمی جهت پراکندن آنها در سطح شبکه به صورت تصادفی، پیشنهاد شده است. در این روش گره‌ها خودشان و بدون نیاز به ارتباط با گره‌های دیگر، تعیین می‌کنند که در ابتدای هر دور به عنوان سرخوشه فعالیت کنند یا خیر. سپس گره‌هایی که به عنوان سرخوشه انتخاب می‌شوند این موضوع را به گره‌های اطراف خود اطلاع می‌دهند و گره‌های اطراف نیز با دریافت پیغام سرخوشه‌ها، گره‌ای را به عنوان سرخوشه انتخاب می‌کنند که بیشترین قدرت سیگنال را از آن دریافت کنند. سپس در داخل هر خوشه برای جلوگیری از تداخل بین سیگنالهای خوشه‌های مجاور از روش CDMA استفاده می‌شود.

همچنین روشی به نام GEAR [4] جهت بهبود عملکرد روش انتشار هدایت شده پیشنهاد شده است که در این روش، به جای انتشار علاقه‌مندی‌ها به‌صورت سیل‌آسا، از محتویات آنها جهت انتشارشان استفاده می کنیم و علاقه‌مندی‌ها تنها در ناحیه مورد نظر، انتشار می یابند. همچنین به کمک این روش، منابع موجود، در مسیر یابی تاثیر داده می‌شوند تا استفاده از منابع به صورت بهینه‌تری صورت پذیرد.

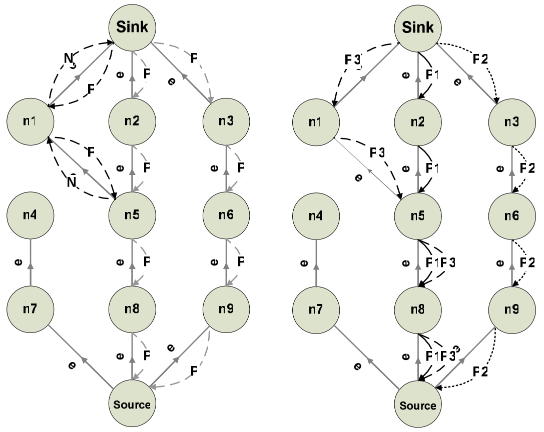
در [5] یک الگوریتم مسیریابیِ چند مسیره بر اساس روش انتشار هدایت شده پیشنهاد شده است. در این روش گره مقصد (سینک) تمامی بسته‌های داده‌های اکتشافی را که از طریق همسایه‌های مختلف به مقصد می‌رسند، تقویت می‌کند (یک بسته تقویت کننده مثبت به همسایه‌ای که داده اکتشافی را فرستاده ارسال می‌کند). این روش ساده‌ترین روش ممکن برای تشکیل مسیرهای چندگانه می‌باشد. برای تشکیل مسیرهای متمایز می‌توان در نقطه‌ای که یک بسته تقویت کننده به مسیر تکراری رسید، گره دریافت کننده بسته، یک بسته تقویت کننده منفی را در جهت خلاف حرکت بسته تقویت کننده مثبت (به سمت سینک) ارسال کند.  البته در مرجع ذکر شده مسیریابی چند مسیره به منظور بهبود حالت ارتجاعی شبکه به‌کار برده شده است. در شکل نحوه مسیریابی در دو حالت مسیریابی با گره‌های مشترک (الف) و مسیریابی با گره‌های متمایز (ب)  در یک توپولوژی نمونه نشان داده شده است. در این شکل P نشان دهنده بسته تقویت کننده مثبت و N نشان دهنده بسته تقویت کننده منفی و e نشان دهنده داده اکتشافی است.

همانطور که در شکل ۱ قابل تشخیص است، در حالت الف، سه مسیر P1، P2 و P3 کشف می‌شوند، اما در حالت ب فقط دو مسیر کشف می‌شوند و گرهٔ n5 یک بستهٔ تقویت کنندهٔ منفی برای n1 و n1 برای سینک ارسال میکنند که از تشکیل مسیر سوم جلوگیری می‌کند. لازم به ذکر است نتایج حاصل از پیاده‌سازیِ این الگوریتم در بخش شبیه سازی و با عنوان الگوریتم SMR[8] ارائه شده‌است.

## ۳- الگوریتم پیشنهادی

در این بخش، یک روش جهت تشکیل مسیرهای چندگانه بین مبدا و مقصد بر اساس الگوریتم DD و به صورت پیشدستانه پیشنهاد می‌دهیم.

در این الگوریتم، هنگام فرستادن بسته‌های داده‌های اکتشافی، در منبع به آنها برچسب شناسه مسیر(MP_ID) می‌زنیم. سپس هنگام رسیدن آنها به گره سینک، اولین بسته‌ای که از هر شناسه به گره مقصد می‌رسد را تقویت می‌کنیم. در این روش می‌توان از یک راهبرد جهت تشکیل مسیرهای مجزا[9] استفاده کرد که در ادامه خواهد آمد.

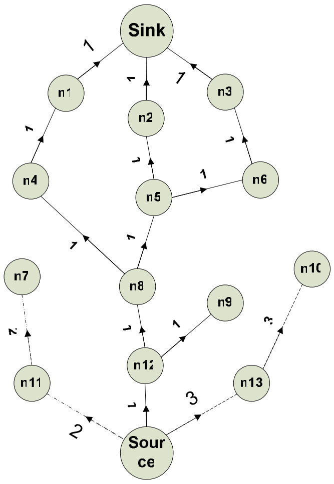



**شکل(۱) مسیریابی چندمسیره ساده با مسیرهای مشترک و متمایز**

## ۳-۱- روش چندمسیری پیشدستانهٔ مجزا

کارایی روش مسیریابی چندگانه ساده (روش SMR پیشنهاد شده در [5]) تا حد زیادی به توپولوژی شبکه و موقعیت گره‌های منبع و مقصد نسبت به هم بستگی دارد. مشکل اصلی این روش اینست که احتمال بوجود آمدن مسیرهای متمایز از هم، بسیار پایین است و در اغلب حالات، مسیرهای متفاوت پس از گذشتن از چند گام به یک مسیر واحد همگرا می‌شوند. علت اصلی این مشکل به ماهیت ارسال بسته‌های ارسال شده به روش همه‌پخشی بازمی‌گردد. از آنجایی که در شبکه‌های بیسیم از رسانه مشترکی برای ارسال بسته‌ها استفاده می‌شود، معمولاً در منبع که در ابتدا بسته داده اکتشافی را به صورت همه‌پخشی به تمام گره‌های همسایه ارسال می‌کند، احتمال تصادم بین بسته‌ها در رسانه مشترک بالاتر است ولی اولین بسته‌ای که بتواند از فضای پر از تصادم اطراف گره منبع، خودش را به سمت گره مقصد برساند، در فضای آزاد به سرعت منتشر می‌شود و همه فضای اطراف گره مقصد و مسیرهای منتهی به آنجا را قبل از رسیدن سایر بسته‌ها، پیمایش می‌کند که این فرایند را "فرایند بسته پیشتاز" می‌نامیم. به همین دلیل هم احتمال رسیدن سایر بسته‌ها به گره مقصد از سایر مسیرهای ممکن، نسبتاً پایین است. این مشکل در شکل ۲ نشان داده شده‌است.

همانطور که در شکل ۲ مشاهده می‌شود، بستهٔ با شناسهٔ 1 زودتر از بقیهٔ بسته ها به برخی از گره‌ها (مثلا n8) می‌رسد، در این سناریو گرهٔ سینک سه بسته را به ترتیب از n1 و n2 و n3 دریافت می‌کند، در صورتی که شناسهٔ همهٔ این بسته‌ها 1 می‌باشد و بسته‌های با شناسه‌های دیگر اصلاً به گرهٔ سینک نمی‌رسند.



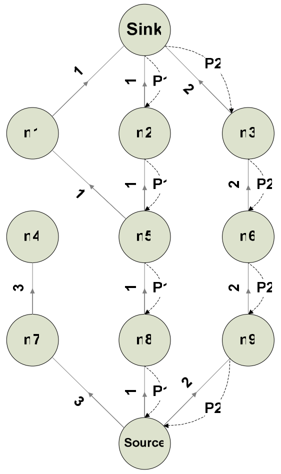

**شکل (۲) مشکل بسته های پیشتاز**

همچنین قابلیت کنترل پذیری روش مسیریابی SMR نسبتاً پایین است و به جز تعداد مسیرهای اولیه تقویت شده، هیچ پارامتر دیگری برای کنترل مسیرهای چندگانه، در دسترس نداریم و همچنین در این روش تشخیص کیفیت مسیرهای متمایز تشکیل شده برای گره منبع امکان پذیر نمی‌باشد. از آنجایی که هدف اصلی ما در این مقاله، توازن بار بین گره‌های مبدا و مقصد می‌باشد، متمایز بودن مسیرهای تشکیل شده برای ما اهمیت بسیاری خواهد داشت.

روش مسیریابی چندگانهٔ پیشدستانه با مسیرهای مجزا تا حد زیادی شبیه روش SMR است با این تفاوت که در این روش از آنجایی که بسته‌های داده اکتشافی با شناسه مسیر برچسب زده می‌شوند، گره مقصد می‌تواند تنها مسیرها دارای برچسب‌های متفاوت را تقویت کند، یعنی در این حالت می‌توانیم در گره مقصد، از تمایز مسیرهای چندگانه و تعداد آنها، اطمینان حاصل کنیم. همانطور که واضح است، مشکل "فرآیند بسته پیشتاز" در این روش همچنان مانع از تشکیل مسیرهای متمایز گردد. همچنین مشکل دیگر این روش اینست که به دلیل "فرآیند بسته پیشتاز"، حتی در صورت تشکیل مسیرهای متمایز، این مسیرها نسبت به مسیر اولیه انحراف زیادی خواهند داشت که باعث افزایش تعداد گام‌های مسیر و به تبع آن، افزایش تاخیر و انرژی مصرف شده جهت انتقال داده‌ها در طول مسیر خواهد شد. برای حل این مشکل در این الگوریتم چهار روشِ بهبود پیشنهاد شده است که در زیر به بررسی هر یک می‌پردازیم.

در این روش از داده‌های اکتشافی با مشخصه‌های یکسان (شناسه عدد تصادفی و شماره بسته) و شناسه مسیر متفاوت برای تشکیل مسیر استفاده می‌شود. بنابراین در این روش، مسیرهای کاملاً متمایزی در صورت امکان تشکیل خواهند شد، زیرا هر گره (البته به جز گره مقصد)

از داده‌های اکتشافی تکراری صرف نظر خواهد کرد. این روش در شکل ۳ نشان داده شده‌است.




**شکل (۳) مسیریابی چندمسیری پیشدستانه با مسیرهای مجزا**

همانطور که در شکل ۳ نشان داده شده‌است، دو مسیر بین گرهٔ مبدا و گرهٔ سینک کشف می‌شود. در این شکل شناسهٔ مسیرها نشان داده شده‌اند. تا اینجای کار الگوریتم پیشنهادی قدری شبیه الگوریتم SMR می‌باشد، اما در الگوریتم پیشنهادی می‌توان از چهار رویکرد و تغییر جهت ایجاد بهبود در کارآیی الگوریتم استفاده کرد. این راهبردها عبارتند از:

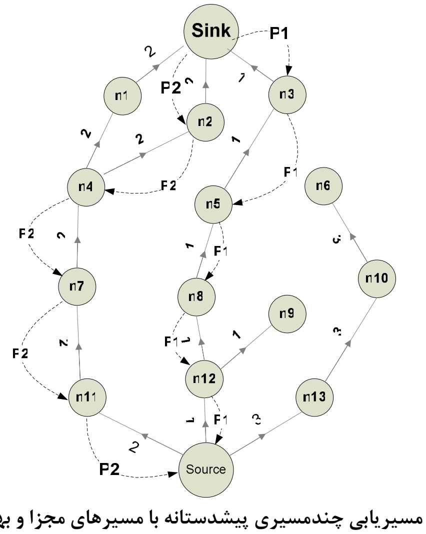
**در راهبرد اول** هر گره قبل از ارسال بسته‌های دادهٔ اکتشافی، به اندازهٔ یک زمان تصادفی (D) صبر کرده، سپس آن را برای همسایه‌های خود پخش می‌کند. این روش را RDI[10] می‌نامیم. در واقع در این بهبود هنگام ارسال بسته‌های داده اکتشافی، قبل از ارسال هر بسته به گره‌های همسایه، از یک تاخیر تصادفی استفاده می‌کنیم. این تاخیر در بسیاری حالات باعث می‌شود تا بسته پیشتاز نتواند تمامی گره‌های مسیر را قبل از سایر بسته‌ها پیمایش کند و تا حد زیادی احتمال تشکیل مسیرهای متمایز را افزایش می‌دهد

**در راهبرد دوم** هر گره بسته های دادهٔ اکتشافی را با احتمال p برای همسایه‌های خود پخش می‌کند. این روش را RFI[11] می نامیم در واقع در این روش از ایده مسیریابی به روش شایعه پراکنی برای انتقال بسته‌های داده‌های اکتشافی استفاده می‌شود، به این صورت که یک احتمال (P) برای پراکندن بسته برای هر همسایه در نظر گرفته می‌شود و بسته به تمامی همسایه‌ها انتقال داده نمی‌شود. این روش نیز تا حد زیادی احتمال تشکیل مسیرهای متمایز را بهبود می‌بخشد (بیشتر از روش اول) ولی در عوض، در این روش احتمال پیدا شدن مسیرهای بهینه به سمت مقصد کاهش پیدا می‌کند و مسیرهای طولانی‌تر و ناهموارتری نسبت به حالت قبلی تشکیل خواهند شد. ایراد دیگر این روش اینست که بر خلاف روش‌های قبلی، این روش پیدا شدن حداقل یک مسیر را در صورت وجود داشتن تضمین نمی‌کند.

**در راهبرد سوم** هر گره بسته‌های دادهٔاکتشافیِ دریافتی را بجای ارسال به صورت سیل آسا به تمامی همسایه‌ها، تنها به تعداد محدودی (برابر با پارامتر F) از همسایه‌ها ارسال می‌کند. این عمل به میزان بسیاری سربار ناشی از انتشار بسته‌های دادهٔ اکتشافی را کاهش می‌دهد. علاوه بر این با استفاده از این روش تعداد مسیرهای تشکیل شده در الگوریتم‌های مسیریابی نیز بهبود قابل توجهی خواهد یافت. این بهبود را LFI[12] می‌نامیم و یک مثال از این روش را می‌توان در شکل ۴ مشاهده کرد. در واقع بهبود سوم مشابه بهبود دوم است با این تفاوت که به جای در نظر گفتن احتمالی برای انتقال بسته‌ها به سمت منبع، در این روش هر گره، بسته‌های داده‌های اکتشافی را به سمت F همسایه اول که به منبع نزدیک‌ترند هدایت می‌کند. با این انتخاب هوشمندانه، احتمال تشکیل مسیرهای متمایز با به سمت گره مقصد افزایش پیدا خواهد کرد و بر خلاف دو بهبود قبلی، مسیرهای تشکیل شده، طول مناسبی خواهند داشت. برای تشخیص گره‌های نزدیک‌تر به مقصد می‌توانیم از برچسب زمانی هر گرادیان که در هنگام تشکیل آن مقدار دهی می‌شود، استفاده کرد.

**در راهبرد چهارم** می‌توان از ترکیب راهکارهای ارائه شده در بالا استفاده کرد. مانند استفاده همزمان از احتمال F و تاخیر D برای انتشار بسته‌های دادهٔاکتشافی. این روش را HI[13] می‌نامیم.

نکتهٔ بسیار مهم این است که نتایج شبیه سازی نشان می‌دهند راهبرد سوم جهت بهبود (یعنی بهبود LFI) کارآیی بهتری از خود نشان می‌دهد. شکل ۴ روش چندمسیری پیشدستانه با مسیرهای مجزا را بعد از اعمال بهبود LFI و شکل ۵ شبه کد مربوط به عملکرد گره‌ها در این الگوریتم را نشان می‌دهد. نتایج حاصل از ارزیابی و شبیه‌سازی در بخش ۵ ارائه شده‌اند.




**شکل (۴) مسیریابی چندمسیری پیشدستانه با مسیرهای مجزا و بهبود LFI**

## ۴- روش‌های توازن انرژی در مسیرهای چندگانه

همانطور که در مقدمه مطرح شد، یکی از مسایل بسیار با اهمیت در شبکه‌های حسگر، مساله انرژی است و یکی از روش‌هایی که می‌توان جهت ایجاد توازن انرژی در سطح شبکه مطرح کرد، ایجاد مسیرهای چندگانه و پخش داده‌های انتقالی بین گره‌های مبدا و مقصد، میان این مسیرهای متمایز یا شبه متمایز است. در الگوریتم DD، همیشه کوتاه‌ترین مسیر بین گره مبدا و مقصد، جهت انتقال ترافیک بین این دو گره انتخاب می‌شود. این امر باعث می‌شود که انرژی گره‌های مسیر انتخاب شده به سرعت تخلیه شوند. نکته منفی دیگر که این مشکل را تشدید می‌کند، اینست که در صورت تخلیه شدن یک مسیر، کوتاه‌ترین مسیر بعدی که معمولاً مسیر مجاور این مسیر است، انتخاب خواهد شد. این امر به مرور زمان خصوصاً در هنگامی که فاصله بین گره مبدا و مقصد زیاد باشد، می‌تواند باعث جدا شدن قسمت‌های مختلف شبکه گردد.

در روش پیشنهادی ما، ابتدا با استفاده از روش‌های مطرح شده در بخش قبلی، چند مسیر متمایز یا شبه متمایز، بین گره‌های مبدا و مقصد تشکیل می‌دهیم. سپس بسته‌های ارسالی را میان این چند مسیر تقسیم می‌کنیم. برای تقسیم بسته‌ها در بین مسیرها می‌توان از معیارهای مختلفی استفاده کرد.

یکی از معیارهای مهم برای این امر، انرژی حداقل هر مسیر می‌باشد. انرژی حداقل یک مسیر عبارتست از میزان انرژی گره با حداقل انرژی در آن مسیر. برای توازن مناسب بار در بین گره‌های می‌توانیم احتمال انتخاب یک مسیر برای یک بسته را متناسب با حداقل انرژی آن مسیر، در نظر بگیریم. در این حالت مسیرهای با حداقل انرژی بیشتر، بسته‌های بیشتری را نسبت به مسیرهای با حداقل انرژی کمتر، منتقل خواهند کرد.

معیار دیگر می‌تواند طول مسیر باشد، یعنی مسیرهای با طول کمتر، شانس بیشتری برای انتخاب شدن داشته باشند زیرا طول یک مسیر، رابطه مستقیمی با میزان انرژی مصرف شده جهت انتقال بسته در طول مسیر خواهد داشت پس بنابراین برای کاهش سربار انرژی مصرفی جهت انتقال بسته‌های داده، بهتر است از مسیرهای با تعداد گام کمتر، بیشتر استفاده کنیم.

اگر l (i) طول و e(i) انرژی حداقل مسیر i ام باشد، احتمال انتخاب یک مسیر از مسیرهای موجود، به عنوان مسیر انتقال یک بسته داده، از رابطه زیر بدست خواهد آمد:

$$P_{sel}(i) = c\,\frac{e_p(i)}{l_p(i)}$$

که مقدار c و ep(i) از رابطه زیر بدست خواهد آمد:

$$e_p(i) = \begin{cases} e(i) & e(i) > e_{th} \text{ and } n > o \\ 0 & e(i) < e_{th} \end{cases} \quad , e_{th} = \max[e(i)]/2$$

$$l_p(i) = \begin{cases} l(i) & l(i) < l_{th} \text{ and } n > o \\ 0 & l(i) > l_{th} \end{cases} \quad , e_{th} = \min[l(i)]*2$$

$$c = \frac{1}{\sum_{i=1}^{i=n} \frac{e_p(i)}{l_p(i)}}$$

در روابط بالا eth، حداقل میزان انرژی یک مسیر و lth حداکثر طول مسیر، جهت شرکت مسیر در فرآیند مسیریابی و Psel احتمال انتخاب هر مسیر به عنوان مسیر بعدی در فرآیند مسیریابی است و نهایتاً n، تعداد مسیرهای تشکیل شده به سمت گره مقصد است. انتخاب eth برای این منظور است که مسیرهایی را که حداقل انرژی آنها کمتر از یک حد آستانه باشد را در مسیریابی شرکت ندهیم و آن را برابر نصف حداقل انرژی مسیر با بیشترین حداقل انرژی، در نظر می‌گیریم.

در این الگوریتم، اطلاعات مربوط به طول مسیر و حداقل میزان انرژی گره‌ها، در مرحله ابتدایی در داخل پیغام‌های تقویت کننده مسیر، ذخیره می‌شوند. برای بروز کردن اطلاعات مربوط به انرژی مسیرها، از پیغام‌هایی با نرخ پایین استفاده می‌کنیم تا سربار الگوریتم را به حداقل برسانیم.

## ۵- شبیه‌سازی

در این بخش به بیان نتایج حاصل از شبیه سازی الگوریتم پیشنهادی می‌پردازیم. در بخش ۵-۱ جزئیات شبیه سازی آورده شده‌اند و در بخش ۵-۲ نتایج شبیه سازی ارائه شده‌اند.

برای این منظور الگوریتم‌های زیر شبیه سازی و با هم مقایسه شده‌اند:

- الگوریتم انتشار هدایت شدهٔ خالص، که با عنوان DD در نتایج مشخص شده است.
- الگوریتم چندمسیریِ ساده [5] که با عنوان SMR در نتایج مشخص شده‌است.
- الگوریتم چندمسیریِ پیشدستانهٔ مجزا به صورت خالص و بدون بهبودهای معرفی شده، که با عنوان PMR14 در نتایج مشخص شده است.
- الگوریتم چندمسیریِ پیشدستانهٔ مجزا با بهبود RDI ، که با عنوان PMR(D) درنتایج مشخص شده است.
- الگوریتم چندمسیریِ پیشدستانهٔ مجزا با بهبود LFI، که با عنوان PMR(P) درنتایج مشخص شده است.
- الگوریتم چندمسیریِ پیشدستانهٔ مجزا با بهبود RFI ، که با عنوان PMR(F) در نتایج مشخص شده است.

```
[Source Node]
if (received an INTEREST packet)  then {
            send EXPLORATORY_DATA to each neighbor with different PATH_ID tag
}
if (received a POSITIVE_REINFORCEMENT packet) {
            add the last_hop  as a new path with PATH_ID to the PATH_LIST
}
if (received DATA packet from upper layers) {
            select next path with the load-balancing algorithm and send data to the selected next hop
}

[Relay Node]
if (received a new EXPLORATORY_DATA packet) {
            if (use LIMITED_FORWARD_IMPROVEMENT method) {
                        forward packet to first k neighbors with least gradient timestamp
                        (k is the LFI forwarding factor)
            }
            if (use RANDOM_FORWARD_IMPROVEMENT method) {
                        generate a random number k between 0 and 1 and if k > RANDOM_FORWARD_FACTOR then forward
                        packet to neighbors
            }
            if (use RANDOM_DELAY_IMPROVEMENT method) {
                        generate a random number k between 0 and max_delay and wait for k milliseconds, then forward packet
                        to neighbors
            }

}

[Sink Node]
if (received EXPLORATORY_DATA packet) {
            if (last_hop has a new PATH_ID) {
                        tag a POSITIVE_REINFORCEMENT packet with PATH_ID of EXPLORATORY_DATA and send it to
                        packet last_hop
            }
}
```

**شکل (۵) شبه کد الگوریتم چندمسیری پیشدستانه با مسیرهای مجزا و بهبود LFI**

- الگوریتم چندمسیریِ پیشدستانهٔ مجزا بـا بهبودهـای LFI و RDI ، که بـا عنـوان PMR(DP) در نتـایج مـشخص شـده است.

نکتهٔ قابل توجه این است که نتایج مربوط بـه الگـوریتم هـای SMR و PMR دقیقاً مشابه هم هستند، به همین دلیل در شکل‌ها و نمودارها به همراه هم رسم شده‌اند.

## ۵-۱- جزئیات شبیه سازی

در این بخش به بررسی نحوهٔ آماده سازی محیط شبیه سـازی و انجـام تنظیمات می‌پردازیم.

برای شبیه سازی ما از نرم افزار شبیه ساز NS-2 نسخهٔ 2.30 اسـتفاده کرده‌ایم[6]. در ایـن نـرم افـزار الگـوریتم Directed Diffusion در دو نسخه پیاده سازی شده است که ما از پروتکل نـسخهٔ ۳ اسـتفاده کـرده ایم. این پروتکل پیاده سازی کامل‌تری نـسبت بـه نـسخهٔ دیگـر دارد و برای شبیه سازی منجر به تولید نتایج واقع بینانه تری می‌شود.

### مدل بار و انرژی

در الگوریتم DD سنتی، هر ۳۰ ثانیه یک بار بـسته هـای علاقـه‌منـدی ارسال می‌شوند و داده‌های اکتشافی، هر ۵۰ ثانیه یک بـار ارسـال مـی-شوند. ما در واقع دو سناریوی کلی را برای شـبیه سـازی پیـاده سـازی کرده‌ایم. در اولین سناریو از تمام پارامترهای موجـود در نـسخهٔ اصـلیِ الگوریتم DD استفاده کرده‌ایم کـه در ایـن حالـت از ترافیـک Ping در لایهٔ کاربرد و با نرخ ارسال ۱۰ بسته در ثانیه استفاده کـرده‌ایـم. امـا در دومین سناریو، ما از ترافیک ping با نرخ هر ۵ ثانیه یک بـسته در لایـهٔ کاربرد استفاده کرده‌ایم؛ اما در این حالت جهت بـارز تـر کـردن سـربار مسیریابی، فاصلهٔ زمانی بین ارسال بسته های علاقه مندی را ۳۰۰ ثانیه و فاصلهٔ زمانی بین ارسال داده‌های اکتشافی را ۵۰۰ ثانیه درنظر گرفتـه ایم.

در نسخهٔ اصلی الگوریتم DD از پروتکل IEEE 802.11 در لایـهٔ Mac استفاده می‌شود. اما جهت مقایسه کار خود بـا [6] و بـرای برابـر بـودن شرایط شبیه سازی، هماننـد [7] از مـدل PCM-CIA WLAN بـرای انرژی و Mac استفاده کرده‌ایم.

در این مقاله بُرد رادیویی گره‌ها در همهٔ شرایط، ۲۰۰ متر می‌باشد.

### محاسبه و ارزیابی چندمسیری

برای مقایسهٔ الگوریتم‌های چندمسیریِ پیشنهاد شـده، الگـوریتم‌هـا در یک شبکهٔ توری با ۱۰۰ گره (۱۰ * ۱۰) بکار گرفته شده‌اند که در ایـن بین یک گرهٔ مبدا و یک گرهٔ سینک وجود دارند. هر پروتکل حداقل ۱۵

بار شبیه سازی شده‌است. در شبیه‌سازی های به عمل آمده، ما پارمترهای زیر را اندازه‌گیری کرده‌ایم.

**محاسبهٔ زمان اتصال، تاخیر و سربار**

برای ارزیابی بهبود مصرف انرژی از یک طرف و ارزیابی تاثیر متعادل کردن بار بر روی افزایش طول عمر گره‌ها از طرف دیگر، ما دو سناریویی که در بخش ۴ ارائه شده‌اند را پیاده سازی کرده‌ایم. در این حالت ما میزان انرژی اولیه ای که در اختیار گره‌ها می‌باشد را ۵ ژول در نظر گرفته ایم.

در سناریوی ما، مبدا از ابتدا تا زمانی که ارتباط برقرار باشد، بسته‌های ping را برای سینک به طور متناوب ارسال می‌کند. در این حالت یک ارتباط با تمام شدن انرژی گره‌ها از بین می‌رود. این بازهٔ زمانی را به عنوان پارامترِ مدت زمان ارتباط اندازه‌گیری کرده‌ایم. از طرفی میانگین تاخیر نیز برای هر الگوریتم به طور جداگانه محاسبه می‌شود.

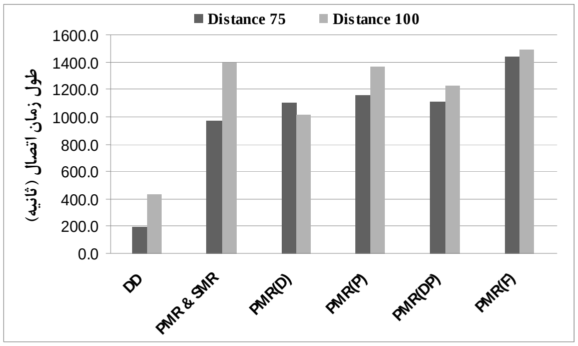
برای ارزیابی سربار مسیریابی، ما تعداد بسته‌های غیرداده‌ای را به ازای دریافت ۱۰۰ بستهٔ داده در سینک اندازه‌گرفته ایم. اینگونه اندازه‌گیریِ سربار از جنب ما ممکن است معیار بی نقصی برای اندازه‌گیری سربار نباشد، اما تخمین مناسبی برای مقایسهٔ الگوریتم‌های مسیریابیِ پیشنهادی می‌باشد.

## ۵-۲- نتایج شبیه سازی

در این بخش به تشریح نتایج به دست آمده از شبیه‌سازی می‌پردازیم.

### ۵-۲-۱- زمان برقراری اتصال

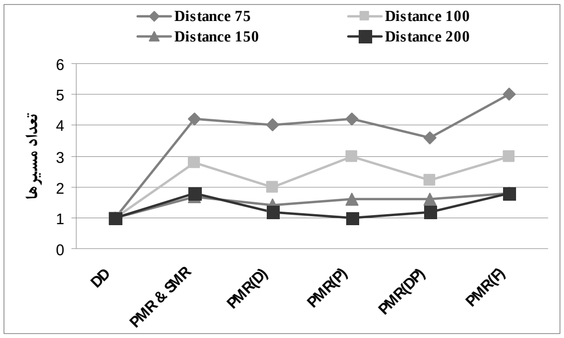
استفاده از مسیریابی چندمسیری و توزیع بار در شبکه، مدت زمان اتصال مبدا و سینک را افزایش می‌دهد. همانطور که در شکل ۶ مشاهده می‌شود، مسیریابی چند مسیری زمان اتصال را افزایش می‌دهد. در این مورد الگوریتم PMR-F بهتر از دیگر الگوریتم‌های پیشنهادی عمل می‌کند که این مسأله ناشی از ارسال های محدود این روش می‌باشد.




**شکل (۶) مقایسهٔ مدت زمان برقراری اتصال‌ها در الگوریتم‌ها**

### ۵-۲-۲- تعدادمسیرهای برقرار شده

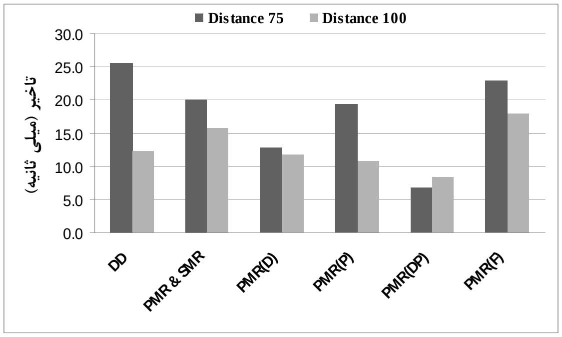
در شکل شمارهٔ ۷ تعداد مسیرهای تشکیل شده در الگوریتم‌های مختلف نشان داده شده‌است. دو نتیجهٔ عمده از این شکل می‌توان گرفت. اولین نکته این است که با افزایش چگالی گره‌ها در شبکه، تعداد مسیرهای کشف شده در همهٔ الگوریتم ها افزایش می‌یابد. دومین نکته این است که از بین این الگوریتم‌ها، الگوریتم PMR-F تعداد مسیرهای بیشتری را کشف می‌کنند.




**شکل (۷) مقایسهٔ تعداد مسیرهای کشف شده در الگوریتم‌ها**

### ۵-۲-۳- میانگین تاخیر در بسته‌های تحویل شده

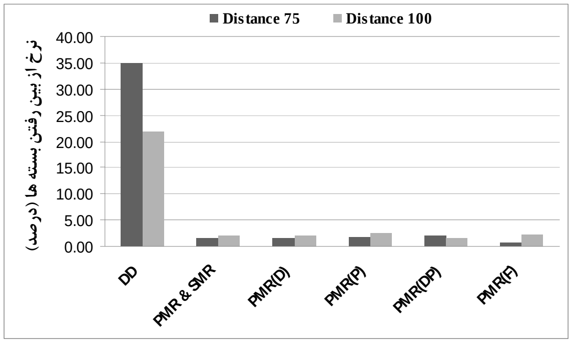
در شکل شماره ۸ این الگوریتم‌ها از نظر میانگین تاخیر انتها به انتها برای بسته‌های داده‌ای که تحویل مقصد می‌شوند، مقایسه شده‌اند. همانطور که در شکل ۸ مشاهده می‌شود، استفاده از ایدهٔ مسیریابی چندمسیری در برخی از روشها مانند PMR-DP تاخیر را کاهش می‌دهد؛ اما در برخی از متدها باعث افزایش تاخیر می‌شود، به خصوص وقتی فاصلهٔ بین منبع و سینک قدری زیاد می‌شود.




**شکل(۸) مقایسهٔ تاخیر تحویل بسته ها به مقصد در الگوریتم‌ها**

### ۵-۲-۴- درصد از بین رفتن بسته‌ها

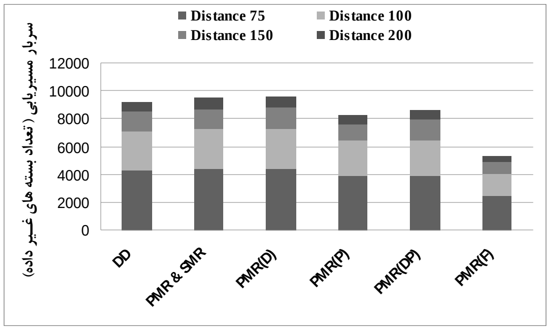
همانطور که در شکل ۹ مشاهده می‌شود، میزان از بین رفتن بسته ها در الگوریتم‌های چندمسیری به طور بسیار چشمگیری بهبود یافته است.




**شکل (۹) مقایسهٔ نرخ از بین رفتن بسته‌ها در الگوریتم ها**

### ۵-۲-۵- سربار مسیریابی

در حالت کلی سربار الگوریتم‌های خانوادهٔ DD با استفاده از ایده‌های RFI و LFI کاهش می‌یابد. به طور شاخص الگوریتم PMR-F سربار کمتری را موجب می‌شود که این امر در شکل ۱۰ نشان داده شده است.




**شکل(۱۰) مقایسهٔ سربار مسیریابی در الگوریتم‌ها**

## ۶- نتیجه‌گیری

در این مقاله، یک روش مسیریابیِ چندمسیریِ پیشدستانه جهت کشف مسیرهای مجزا بر اساس الگوریتم انتشار هدایت شده برای شبکه‌های حسگر بی‌سیم ارائه شد. از طرفی یک روش برای متوازن کردن بار بین گره‌های مبدا و مقصد، از طریق توزیع ترافیک داده‌های منتقل شده بین گره مبدا و مقصد به صورت غیر یکنواخت، پیشنهاد شده است.
نتایج شبیه سازی نشان می‌دهند با استفاده از روش مسیریابی چندمسیریِ پیشدستانه با مسیرهای مجزا و استفاده از مکانیزم توزیع بار پیشنهادی، متوسط طول عمر گره‌ها و همچنین مدت زمان برقراریِ اتصال‌ها نسبت به سایر روش‌ها افزایش می‌یابد. از طرفی درصد از بین رفتن بسته ها نسبت به الگوریتم انتشار هدایت شده به طور قابل توجهی کاهش می‌یابد.

## مراجع


[1] I.F. Akyildiz, W. Su, Y. Sankarasubramaniam, and E. Cayirci, "Wireless sensor networks: a survey," In Proceedings of Computer Networks, 2002, pp.393-422.

[2] C. Intanagonwiwat, R. Govindan, D. Estrin, J. Heidemann, F. Silva, "Directed diffusion for wireless sensor networking," ACM/IEEE Transactions on Networking, vol. 11, no. 1, pp. 2-16, 2002.

[3] W. Heinzelman, A. Chandrakasan, H. Balakrishnan, "Energy Efficient Communication Protocol for Wireless Microsensor Netwroks (LEACH)," Proceedings of 33rd hawaii international conference systems science - vol.8, pp 3005-3014, January 2004.

[4] Y. Yu, D. Estrin, and R. Govindan, "Geographical and Energy-Aware Routing: A Recursive Data Dissemination Protocol for Wireless Sensor Networks," UCLA Computer Science Department Technical Report, UCLA-CSD TR-01-0023, May 2001.

[5] D. Ganesan, R. Govindan, S. Shenker, D. Estrin. "Highly Resilient Energy-efficient Multipath Routing in Wireless Sensor Networks," Proceedings of ACM MOBIHOC, pp 251--253, 2001.

[6] ns-2.33 network simulator.

[7] Handziski, A. K¨opke, H. Karl, C. Frank, W. Drytkiewicz, "Improving the Energy Efficiency of Directed Diffusion Using Passive Clustering," European Workshop on Wireless Sensor Networks 2004 (EWSN 2004), pp. 172–187, 2004.


## زیرنویس‌ها

---

[1] Sensor Networks.
[2] Ad-Hoc Networks.
[3] Directed Diffusion.
[4] Interest packets.
[5] Sink.
[6] Node-Disjoint paths
[7] Proactive Multipath Routing.
[8] Simple Multipath Routing.
[9] Disjoint.
[10] Random Delay Improvement.
[11] Random Forward Improvement.
[12] Limited Forward Improvement.
[13] Hybrid Improvement.
[14] Proactive Multipath Routing.