بهبود کیفیت خدمات در شبکه‌های حسگر بی‌سیم با استفاده از مسیریابی چندگانه

مرجان رادی[۱]، بهنام دزفولی[۲] و محمدعلی نعمت بخش[۳]
۱- دانشجوی کارشناسی ارشد، دانشکده کامپیوتر، دانشگاه آزاد اسلامی واحد نجف آباد، radi@iaun.ac.ir
۲- دانشجوی کارشناسی ارشد، دانشکده کامپیوتر، دانشگاه آزاد اسلامی واحد نجف آباد، dezfouli@iaun.ac.ir
۳- دانشیار، دانشکده کامپیوتر، دانشگاه اصفهان، nematbakhsh@eng.ui.ac.ir

چکیده

از آنجا که در بسیاری از کاربردهای شبکه‌های حسگربی‌سیم نیازمند تضمین پارامترهای کیفی انتها به انتهای معینی می‌باشیم، حمایت از کیفیت خدمات در این شبکه‌ها از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است. به همین دلیل در سال‌های اخیر تکنیک‌های مسیریابی چندگانه به‌عنوان روشی برای حمایت از کیفیت خدمات در شبکه‌های حسگربی‌سیم مورد توجه قرار گرفته است. تکنیک‌های مسیریابی چندگانه با ایجاد چندین مسیر بین نودهای منبع و مقصد معیارهایی از قبیل قابلیت اطمینان، میزان توان مصرفی، تأخیر، گذردهی و پهنای باند را بهبود می‌بخشند. در این مقاله ابتدا چالش‌های موجود در حمایت از کیفیت خدمات در شبکه‌های حسگر بی‌سیم را بیان کرده و سپس مزایای استفاده از روش‌های مسیریابی چندگانه را شرح می‌دهیم. همچنین عناصر تشکیل دهنده‌ی یک پروتکل مسیریابی چندگانه را معرفی خواهیم کرد. در ادامه تعدادی از پروتکل‌های مسیریابی طراحی شده برای شبکه‌های حسگربی‌سیم را براساس کاربردشان طبقه‌بندی نموده و طراحی آن‌ها را بررسی می‌کنیم. در پایان نیز برخی از راهبردهای مورد استفاده در شبیه‌سازی شبکه‌های حسگر بی‌سیم را ارائه می‌کنیم.

واژه‌های کلیدی

شبکه‌های حسگربی‌سیم، کیفیت خدمات، مسیریابی چندگانه، قابلیت اطمینان.

۱– مقدمه

پیشرفت‌های اخیر در ساخت مدارهای مجتمع با اندازه‌های کوچک از یک‌سو و توسعه فناوری ارتباطات بی‌سیم از سوی دیگر زمینه‌ساز طراحی شبکه‌های حسگربی‌سیم[۱] می‌باشد.

با توجه به الگوی جدید جمع‌آوری اطلاعات توسط شبکه‌های حسگربی‌سیم این شبکه‌ها در کاربردهای مختلفی از قبیل مراقبت‌های پزشکی، کنترل محیط، گزارش بلایای طبیعی، سیستم‌های نظامی، سیستم‌های امنیتی، سیستم‌های نظارت و کنترل ترافیک به‌کار گرفته شده‌اند [1] [2] [3]. از آنجا که کاربردهای مختلف در شبکه‌های حسگربی‌سیم نیازمند برآورده‌سازی پارامترهای کیفی متفاوتی (مانند میزان تأخیر، میزان قابلیت اطمینان، میزان پهنای باند لازم و غیره) می‌باشند، طراحی پروتکل‌هایی که با توجه به مشکلات ناشی از ویژگی‌های منحصربه فرد شبکه‌های حسگربی‌سیم (از قبیل توان و پهنای باند محدود، ارتباطات غیر قابل اعتماد، آسیب‌پذیری نودهای، و غیره)، نیازمندی‌های مربوط به کیفیت خدمات[۲] (QoS)، را در این شبکه‌ها درنظر می‌گیرند، ضروری می‌باشد [4] [5] [6] [7].

پروتکل‌های مسیریابی مختلفی تاکنون برای شبکه‌های حسگربی‌سیم طراحی شده است [8] [9] [10]. بسیاری از این پروتکل‌ها برای انتقال داده‌ها، تنها از یک مسیر بهینه استفاده می‌کنند. این مسیر براساس معیارهایی نظیر جهت انتقال داده‌ها،

فاصله تا نود مقصد، و سطح انرژی باقی‌مانده در هر نود، تعیین می‌شود. در این دسته از پروتکل‌ها هنگامی که یک مسیر اصلی بین نودهای منبع و مقصد شناسایی شد داده‌ها از طریق مسیر شناسایی شده ارسال می‌شوند. اما استفاده‌ی مداوم از یک مسیر باعث می‌شود انرژی نودهای موجود در آن مسیر سریع‌تر از سایر نودهای شبکه مصرف شود و در مدت کوتاهی دسترسی به نودهایی که در همسایگی نودهای مسیر اصلی قرار گرفته‌اند امکان پذیر نباشد. به این ترتیب شبکه به چند بخش مجزا تفکیک شده و از آن پس کارایی لازم را نخواهد داشت. در ضمن با توجه به پایین بودن قابلیت اطمینان کانال‌های بی‌سیم، استفاده از یک مسیر منجر به کاهش قاابلیت اطمینان در ارسال داده‌ها خواهد شد. بنابراین با توجه به موارد ذکر شده، پروتکل‌های مسیریابی تک‌مسیری کارایی لازم را در شبکه‌های حسگربی‌سیم نخواهند داشت.

گروهی از پروتکل‌های مسیریابی به‌نام مسیریابی چندگانه[3]، کلاسی از الگوریتم‌های مسیریابی را معرفی می‌کنند که به هر نود منبع اجازه می‌دهند برای ارسال داده‌ها چندین مسیر مختلف را به سمت نود مقصد شناسایی کند. با استفاده از این تکنیک می‌توان ترافیک شبکه را با توجه به کیفیت هر مسیر، روی چندین مسیر تقسیم نمود. به‌این‌ترتیب از منابع سیستم به بهترین نحو استفاده شده و کیفیت خدمات لازم برای هر کاربرد نیز فراهم می‌شود. مسیریابی چندگانه برای اهداف متفاوتی (نظیر افزایش پهنای باند، کاهش تأخیر، کاهش ازدحام در شبکه، تحمل‌پذیری درمقابل خرابی‌ها و بهبود قابلیت اطمینان) در شبکه‌های مختلف به‌کار گرفته شده است [11] [12] [13]. اما محدودیت‌های موجود در شبکه‌های حسگربی‌سیم نیازمندی‌های جدیدی را در استفاده از این تکنیک‌ها مطرح می‌کند.

ادامه‌ی این مقاله به‌این‌صورت سازمان‌دهی شده است. در بخش ۲ به بررسی چالش‌هایی می‌پردازیم که در حمایت از کیفیت خدمات در شبکه‌های حسگربی‌سیم با آن‌ها مواجه هستیم. در بخش ۳ در مورد پروتکل‌های مسیریابی چندگانه صحبت شده و مزایای حاصل از روش‌های مسیریابی چندگانه را تحلیل می‌کنیم. سپس عناصر تشکیل دهنده‌ی یک پروتکل مسیریابی چندگانه را معرفی خواهیم کرد. در بخش ۴ تعدادی از پروتکل‌های مسیریابی چندگانه ارائه شده برای شبکه‌های حسگربی‌سیم و بی‌سیم موردی را براساس کاربرد آن‌ها طبقه بندی نموده و طراحی آن‌ها را شرح خواهیم داد. در بخش ۵ تعدادی از ابزارهای شبیه‌سازی شبکه‌های حسگربی‌سیم را معرفی نموده و در ادامه‌ی آن به معرفی معیارهای ارزیابی عملکرد شبکه و پارامترهای شبیه‌سازی می‌پردازیم.

۲– چالش‌های موجود در حمایت از کیفیت خدمات در شبکه‌های حسگربی‌سیم

روش‌های بسیاری برای حمایت از کیفیت خدمات در شبکه‌های سیمی پیشنهاد شده است، اما هیچ‌کدام از این روش‌ها را نمی‌توان به‌طور مستقیم در شبکه‌های حسگربی‌سیم به‌کار برد. بنابراین ضمن حمایت از کیفیت خدمات در این شبکه‌ها با چالش‌های فراوانی به شرح زیر روبرو هستیم [14] [15]:

۱. ترافیک نامتعادل: در بسیاری از کاربردهای شبکه‌های حسگر بی‌سیم، ترافیک موجود در شبکه از طرف تعداد زیادی نود حسگر به سمت تعداد کمی از نودهای مقصد جریان می‌یابد. بنابراین پروتکل‌های طراحی شده باید توزیع نامتعادل ترافیک را درنظر بگیرند.

۲. افزونگی در داده‌های جمع‌آوری شده: داده‌های جمع‌آوری شده توسط نودهای حسگر دارای افزونگی فراوانی هستند. اگرچه افزونگی موجود در داده‌های جمع‌آوری شده قابلیت اطمینان داده‌ها را افزایش می‌دهد اما به همین نسبت میزان توان مصرفی را نیز به‌شدت بالا می‌برد. برای حل این مشکل روش‌های متنوعی در رابطه با جمع‌آوری داده‌ها[4] پیشنهاد شده است. اما استفاده از این تکنیک‌ها موجب ایجاد تأخیر در ارسال داده‌ها می‌شود.

۳. پویا بودن شبکه: خرابی نودها، خرابی لینک‌های ارتباطی و حرکت نودها، موجب تغییرات مداوم در توپولوژی شبکه می‌شود. همین امر باعث می‌شود حمایت از کیفیت خدمات در شبکه‌های حسگر بی‌سیم به راحتی امکان‌پذیر نباشد.

۴. خطاهای مربوط به کانال‌های بی‌سیم: خطاهای مربوط به کانال‌های بی‌سیم در شبکه‌های حسگر بی‌سیم موجب گم‌شدن بسته‌های ارسالی می‌شود. با وجود طرح‌های موجود جهت کدکردن کانال، مکانیزم‌هایی جهت ایجاد قابلیت اطمینان در سطح لایه انتقال لازم است. بنابراین الگوریتم‌های جدیدی جهت تشخیص و کنترل ازدحام[5] در این شبکه‌ها مورد نیاز می‌باشد.

۵. وجود انواع مختلف ترافیک: وجود نودهای حسگر ناهمگن نیز چالش‌هایی را در حمایت از کیفیت خدمات در شبکه‌های حسگر بی‌سیم ایجاد می‌کند. برای مثال ممکن است در برخی از کاربردها نیازمند انواع مختلفی از نودهای حسگر برای نظارت بر حرارت، فشار و رطوبت محیط باشیم. در این شرایط، نرخ دریافت اطلاعات از

محیط متفاوت بوده و حمایت از کیفیت خدمات را با مشکل مواجه می‌کند.

۶. توسعه‌پذیری: یک شبکه حسگر بی‌سیم شامل هزاران نود حسگر است. بنابراین نباید هنگام افزایش تعداد نودها کیفیت خدمات کاهش یابد.

۷. محدودیت‌های منبعی: محدودیت‌های منبعی موجود در شبکه‌های حسگر بی‌سیم شامل محدودیت‌های موجود در میزان انرژی، پهنای باند، حافظه، اندازه‌ی بافر، توانایی پردازشی و قدرت انتقال می‌باشد. در میان موارد ذکر شده، توان مصرفی دارای اهمیت فوق‌العاده‌ای است. در بسیاری از کاربردها (نظیر کنترل مرزهای یک کشور)، لازم است که شبکه حسگر بی‌سیم برای ماه‌ها بدون حمایت‌های اضافی از نظر توان مصرفی به فعالیت خود ادامه دهد. بنابراین در شبکه‌های حسگر بی‌سیم باید نیازمندی‌های مربوط به حمایت از کیفیت خدمات با کمترین میزان توان مصرفی برآورده شود. همچنین به‌علت محدودیت‌های موجود در سایر منابع یک نود پروتکل‌های استفاده شده در این شبکه‌ها باید کمترین میزان سربار را در برقراری ارتباطات داشته باشند و تنها بخشی از میزان حافظه فعال موجود را استفاده کنند.

۸. لینک‌های نامطمئن: شبکه‌های حسگر بی‌سیم دارای لینک‌های ضعیفی می‌باشند که به‌طور وسیعی تحت تأثیر عوامل محیطی قرار می‌گیرند. بنابراین، تأخیرهای ارتباطی و میزان قابلیت اطمینان، غیرقابل پیش‌بینی می‌باشند.

۳– مسیریابی چندگانه

مسیریابی چندگانه برای اهداف مدیریتی و کنترلی متنوعی در شبکه‌های مختلف به‌کار گرفته شده است. با استفاده از پروتکل‌های مسیریابی چندگانه می‌توان مشکلات ناشی از تغییرات مداوم در توپولوژی و لینک‌های نامطمئن را حل کرد. اما میزان بهبود پارامترهای کیفیت خدمات، وابسته به توانایی پروتکل مسیریابی چندگانه در شناسایی مسیرهای مجزا می‌باشد. در این بخش به بیان مزایای حاصل از روش‌های مسیریابی چندگانه می‌پردازیم و در ادامه‌ی آن مروری بر عناصر اصلی این پروتکل‌ها خواهیم داشت.

۳–۱– مزایای روش‌های مسیریابی چندگانه

۳–۱–۱– بهبود قابلیت اطمینان و تحمل‌پذیری در مقابل خرابی

از آنجا که توپولوژی شبکه‌های حسگربی‌سیم به‌طور مداوم در حال تغییر می‌باشد و تداخلات امواج رادیویی نیز باعث گم شدن تعداد زیادی از بسته‌ها می‌شوند، تضمین قابلیت اطمینان در این شبکه‌ها بسیار مشکل است.

گروهی از پروتکل‌های مسیریابی‌چندگانه، قابلیت اطمینان و تحمل‌پذیری در مقابل خرابی‌ها را با ارسال چندین کپی از داده‌ها برروی چندین مسیر مجزا بهبود می‌بخشند. اگرچه این روش میزان توان مصرفی را افزایش می‌دهد، اما در هنگام خرابی لینک‌ها احتمال گم شدن داده‌ها کاهش خواهد یافت. برای حل این مشکل روش‌های مختلفی درجهت کاهش سربار حاصل از ارسال داده‌ها ارائه شده است [16] [17].

دسته‌ی دیگری از پروتکل‌ها در هر لحظه تنها از یک مسیر برای انتقال داده‌ها استفاده می‌کنند و در صورت خرابی مسیر اصلی، داده‌ها را از طریق مسیر پشتیبان ارسال خواهند کرد. به‌این‌ترتیب احتمال گم شدن داده‌ها در اثر خرابی مسیر کاهش می‌یابد.

۳–۱–۲– توزیع متعادل بار

با توجه به کاربردهای شبکه‌های حسگربی‌سیم، انتظار می‌رود یک شبکه در دراز مدت به عملیات خود ادامه دهد. بنابراین با توجه به منابع انرژی محدود در هر نود، تمرکز اصلی پروتکل‌های مسیریابی چندگانه برروی جنبه‌های توزیع متعادل بار می‌باشد.

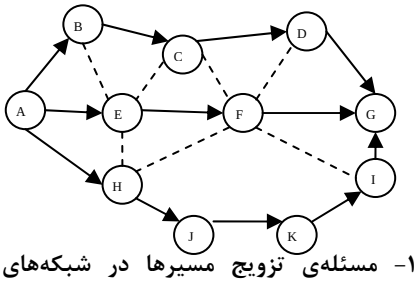
طرح‌های مسیریابی متعارف، همواره از مجموعه نودهای خاصی برای ارسال بسته‌ها به سمت نود مقصد استفاده می‌کنند. مشاهده می‌شود که در این‌گونه موارد، انرژی نودهایی که پیوسته در حال ارسال داده‌ها به سمت نود مقصد هستند سریع‌تر از انرژی سایر نودها مورد استفاده قرار می‌گیرد. بنابراین نودهای موجود در همسایگی نودهای مسیر بهینه، پس از گذشت مدت کوتاهی قابل دسترسی نخواهند بود. اگر میزان انرژی مصرفی در تمامی نودهای موجود در شبکه یکسان باشد میانگین زمان خرابی هر نود افزایش یافته و به‌این‌ترتیب طول عمر شبکه افزایش خواهد یافت. بنابراین با توجه به‌این‌که پروتکل‌های مسیریابی چندگانه ترافیک شبکه را براساس میزان انرژی باقی‌مانده در هر نود بین نودهای موجود در شبکه تقسیم می‌کنند، می‌توان از این تکنیک برای استفاده یکسان از انرژی موجود در تمامی نودهای شبکه استفاده کرد.

۳–۱–۳– افزایش میزان پهنای باند

با تقسیم کردن داده‌های ارسالی مربوط به یک مقصد به چندین جریان داده‌ای که هرکدام از طریق مسیری متفاوت به سمت مقصد ارسال می‌شوند، پهنای باند لازم فراهم خواهد شد. این روش زمانی سودمند است که یک نود دارای چندین لینک با پهنای باند پایین بوده اما نیازمند پهنای باندی فراتر از پهنای باند هرکدام از

لینک‌هایش باشد. ضمن اینکه با ایجاد پهنای باند بیشتر، تأخیر انتها به انتها نیز به‌طور قابل توجهی کاهش خواهد یافت.

این امر در شبکه‌های سیمی که در آن‌ها مسیرهای مختلف کاملاً از یکدیگر مجزا می‌باشند به‌وضوح قابل مشاهده است. اما در شبکه‌های حسگربی‌سیم وجود کانال‌های بی‌سیم اشتراکی دستیابی به این هدف را با مشکل مواجه می‌سازد. هنگامی که نودهای موجود در شبکه، یک کانال بی‌سیم را به اشتراک می‌گذارند و از پروتکل‌های دسترسی به رسانه برای هماهنگی دسترسی به کانال اشتراکی استفاده می‌کنند، فعالیت‌های ارتباطی بین لینک‌های مختلف، مستقل از یکدیگر نخواهند بود. برای مثال در شکل (۱) هنگامی که نود E می‌خواهد بسته‌ای را برای نود F ارسال کند تمامی نودهای موجود در همسایگی این دو نود باید ارسال و دریافت خود را قطع کنند تا نود F بسته ارسالی توسط نود E را به‌درستی دریافت کند. بنابراین در شبکه‌هایی که از یک کانال اشتراکی استفاده می‌شود، مسیرهای نود مجزا عدم وابستگی مسیرها به یکدیگر را تضمین نمی‌کنند. این مشکل در شبکه‌های بی‌سیم تزویج مسیرها[6] نامیده می‌شود [18] [19].



شکل ۱- مسئله‌ی تزویج مسیرها در شبکه‌های بی‌سیم تک‌کانالی

تزویج مسیرها زمانی به‌وجود می‌آید که مسیرها در نزدیکی یکدیگر قرار گرفته باشند. الگوریتم‌های مسیریابی چندگانه‌ای که هنگام انتخاب مسیرها میزان تداخلات[7] رادیویی بین آن‌ها را در نظر نمی‌گیرند بهینه‌سازی بسیار ناچیزی را نسبت به الگوریتم‌های تک مسیری ارائه می‌دهند [20].

نویسندگان در [21] این مشکل را با تعریف فاکتور وابستگی[8] تا حدودی حل نموده‌اند. در این روش، فاکتور وابستگی دو مسیر نود مجزا بر اساس تعداد لینک‌های متصل کننده دو مسیر تعریف می‌شود. به‌این‌ترتیب، پروتکل مسیریابی چندگانه مسیرهایی را انتخاب می‌کند که فاکتور وابستگی کمتری داشته باشند. همین امر احتمال تداخل داده‌های در حال انتقال روی مسیرهای مختلف را کاهش می‌دهد. نویسندگان در [22] [23] [24] [25] تزویج مسیرها را به‌وسیله ایجاد تغییراتی در لایه اتصال داده و یا لایه فیزیکی (مانند استفاده از چندین کانال مختلف برای انتقال داده‌ها و یا آنتن‌های جهت‌دار) کاهش داده‌اند.

۳-۱-۴- کاهش تأخیر

نتایج شبیه‌سازی بسیاری از پروتکل‌های مسیریابی چندگانه، کاهش تأخیر و افزایش گذردهی[9] قابل توجه‌ی را نشان داده‌اند. اگر شبکه‌های حسگربی‌سیم از الگوریتم‌های مسیریابی تک‌مسیری برای انتقال داده‌ها استفاده کنند، در صورت خرابی مسیر اصلی، فرایند شناسایی مسیر، مجدداً راه اندازی خواهد شد. همین امر باعث ایجاد تأخیر در انتقال داده‌ها می‌شود، زیرا پروتکل‌های مسیریابی عندالمطالبه[10] در شبکه‌های حسگربی‌سیم علاوه بر تأخیرهای انتقال، انتشار و صف شامل دو نوع تأخیر دیگر نیز می‌باشند: ۱) تأخیر مربوط به شناسایی مسیر بین نود منبع و مقصد، ۲) تأخیر مربوط به شناسایی مسیر جدید هنگام خرابی مسیر فعال، که تأخیر نوع دوم به مراتب طولانی‌تر از تأخیر نوع اول می‌باشد زیرا خود شامل سه نوع تأخیر است: ۱) زمان طی شده از حرکت بسته از نود منبع تا زمانی که بسته به لینک خراب در مسیر می‌رسد، ۲) مدت زمان لازم برای تشخیص خرابی لینک توسط یکی از نودهای موجود در مسیر، ۳) مدت زمان لازم برای ارسال پیام خطا به نود منبع توسط نودی که خرابی لینک را تشخیص داده است.

تأخیرهای بیان شده را می‌توان با استفاده از الگوریتم‌های مسیریابی چندگانه کاهش داد. به‌این‌صورت که اگر هر نود چندین مسیر به سمت مقصد داشته باشد هنگام خراب شدن مسیر فعال، می‌تواند سریعاً داده‌ها را به‌وسیله‌ی مسیر دیگری ارسال کند. بنابراین علاوه بر این‌که تأخیرها را کاهش می‌دهد از گم شدن بسته‌ها نیز تا حد امکان جلوگیری خواهد شد.

۳-۲- عناصر تشکیل دهنده یک پروتکل مسیریابی چندگانه

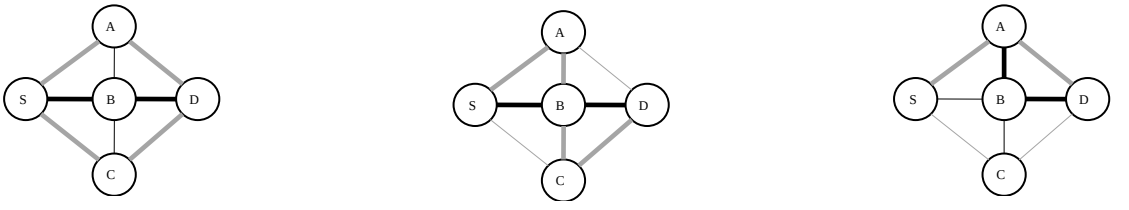
سه عنصر تشکیل دهنده یک پروتکل مسیریابی چندگانه عبارت اند از: شناسایی مسیرها، توزیع ترافیک و نگهداری مسیرها.

۳-۲-۱- شناسایی مسیرها

در مرحله شناسایی مسیرها، مسیرهای فعال بین هر جفت نود منبع و مقصد شناسایی می‌شوند. هر پروتکل معیارهای متفاوتی را برای تعیین مجموعه‌ای از مسیرهای فعال، استفاده می‌کند.

یکی از معیارهای عمومی موجود جهت انتخاب مسیرها، میزان مجزا بودن مسیرها از یکدیگر است. انواع مسیرهای مجزا عبارتند از: لینک مجزا، نود مجزا، و مجزای جزئی. در شکل (۲) انواع مختلف

مسیرهای مجزا نشان داده شده است. مجموعه‌ای از مسیرهای نود مجزا دارای هیچ‌گونه نود مشترکی به‌جز نود منبع و مقصد نمی‌باشند. همچنین مسیرهای لینک مجزا، دارای هیچ‌گونه لینک مشترکی نیستند، اما ممکن است تعدادی نود مشترک را شامل شوند. درحالی که مسیرهای مجزای جزئی می‌توانند دارای تعدادی لینک یا نود مشترک باشند. مسیرهای نود مجزا، مجزا بودن تمامی لینک‌های موجود در مسیرها را تضمین می‌کنند. بنابراین هنگامی که یک نود میانی در مسیرهای نود مجزا خراب شود، تنها مسیری که شامل آن نود می‌باشد از کار می‌افتد در حالی که اگر یک نود میانی در مسیرهای لینک مجزا خراب شود ممکن است مجموعه‌ای از مسیرهای موجود را غیرفعال نماید. خرابی هر لینک در مسیرهای نود مجزا و یا لینک مجزا تنها فعالیت یک مسیر از چندین مسیر فعال را با مشکل مواجه می‌کند.



شکل ۲- مسیرهای SAD, SBD, SCD در شکل الف مسیرهای نود مجزا می‌باشند زیرا دارای لینک یا نود مشترکی نمی‌باشند. مسیرهای SABCD, SBD در شکل ب مسیرهای لینک مجزا می‌باشند زیرا شامل نود مشترک B می‌باشند. و مسیرهای SAD,SABD در شکل ج مسیرهای مجزای جزئی می‌باشند زیرا شامل نود مشترک B و لینک مشترک SA می‌باشند.

۳-۲-۲- توزیع ترافیک

تکنیک‌های مختلفی جهت تخصیص ترافیک به مسیرهای فعال در پروتکل‌های مسیریابی چندگانه وجود دارد. یک پروتکل مسیریابی چندگانه ممکن است ترافیک موجود در شبکه را تنها از طریق یک مسیر با بهترین معیارها ارسال نماید و سایر مسیرهای شناسایی شده را به‌عنوان مسیرهای پشتیبان استفاده کند، یا این‌که از آن‌ها به‌طور همزمان برای ارسال داده‌ها استفاده نماید. معیارهای عمومی برای انتخاب مسیرها عبارتند از: تعداد پرش‌ها[11] تا مقصد، قابلیت اطمینان هر مسیر، میزان انرژی موجود در هر مسیر، میزان مجزا بودن مسیرها از یکدیگر، میزان پهنای باند موجود، میزان تزویج مسیرها، یا ترکیبی از چندین معیار فوق. هنگامی‌که هدف اصلی در طراحی پروتکل مسیریابی چندگانه بهبود کیفیت خدمات باشد، مسیرهایی انتخاب می‌شوند که در آن‌ها، ترکیب معیارهای موجود، نیازمندی‌های کیفی مورد نظر را برآورده می‌سازد.

۳-۲-۳- نگهداری مسیرها

با گذشت زمان ممکن است مسیرهای شناسایی شده، به‌علت خرابی نودها، خرابی لینک‌ها و یا حرکت نودها، خراب شوند. فرایند نگهداری مسیرها عبارت است از شناسایی مجدد چندین مسیر پس از خرابی مسیرهای اولیه. این عملیات می‌تواند بعد از خرابی هر مسیر و یا پس از خرابی تمامی مسیرهای فعال شروع شود. بسیاری از پروتکل‌های مسیریابی چندگانه از الگوریتم‌های مسیریابی پویا برای کنترل کردن و ثابت نگاه داشتن معیارهای کیفیت خدمات در مسیرهای فعال استفاده می‌کنند.

۴- مسیریابی چندگانه در شبکه‌های حسگربی‌سیم و بی‌سیم موردی

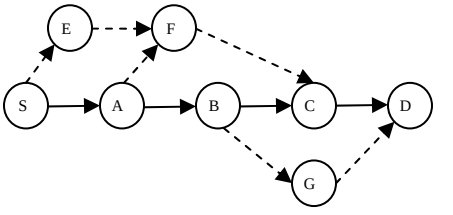
تاکنون، پروتکل‌های مسیریابی چندگانه زیادی با اهداف مختلف برای شبکه‌های حسگربی‌سیم و بی‌سیم موردی ارائه شده است. در این بخش تعدادی از آن‌ها را بر اساس کاربردشان مرور خواهیم کرد.

۴-۱- قابلیت اطمینان و تحمل‌پذیری در مقابل خرابی

نویسندگان در [26] پروتکل مسیریابی چندگانه‌ای را با هدف افزایش تحمل پذیری شبکه‌های حسگربی‌سیم در مقابل خرابی‌ها، ارائه داده‌اند. در این پروتکل تلاش می‌شود مسیرهای مجزای جزئی شناسایی شوند. به‌عنوان مثال، مسیری که تفاوت آن با مسیر اصلی تنها در یک نود باشد نیز یک مسیر پشتیبان است. این الگوریتم بر اساس الگوریتم Directed Diffusion [27] طراحی شده است و از دو نوع پیام تاکیدی[12] و تکنیک‌های محلی برای ساخت مسیرهای مجزای جزئی استفاده می‌کند.

طرز کار این الگوریتم به‌این‌صورت است که نود منبع ابتدا پیام

تاکیدی مربوط به مسیر اصلی را برای یکی از بهترین همسایگان خود ارسال می‌کند. به‌عنوان مثال در شکل (۳)، نود منبع (S)، این پیام را به نود A می‌فرستد. علاوه بر آن پیام تاکیدی مربوط به مسیر پشتیبان ثانویه را نیز به همسایه بعدی خود که نسبت به همسایه قرار گرفته برروی مسیر اصلی، اولویت پایین‌تری دارد ارسال می‌کند. به‌عنوان مثال در شکل (۳)، نود منبع (S) این پیام را به نود E می‌فرستد. نودهای میانی هنگام دریافت پیام تاکیدی مربوط به مسیر اصلی، آن را به بهترین همسایه بعدی خود به سمت مقصد مورد نظر ارسال می‌کنند. به‌این‌ترتیب مسیر پیموده شده توسط پیام تاکیدی مربوط به مسیر اصلی، مسیر اصلی بین نود منبع و نود مقصد را تشکیل می‌دهد. در کنار ارسال پیام تاکیدی مربوط به مسیر اصلی، هر نود برروی مسیر اصلی، مانند نود B نیز پیام تاکیدی مربوط یک مسیر پشتیبان را به همسایه بعدی خود که نسبت به همسایه قرار گرفته برروی مسیر اصلی اولویت پایین‌تری دارد ارسال می‌کند. به‌عنوان مثال، در شکل (۳) نود B پیام تاکیدی مربوط یک مسیر پشتیبان را به نود G می‌فرستد. هنگامی‌که پیام تاکیدی مربوط یک مسیر پشتیبان توسط نودی که بر روی مسیر اصلی قرار نگرفته است دریافت شود، آن را به بهترین همسایه بعدی خود به سمت مقصد ارسال می‌کند؛ در حالی‌که اگر این پیام توسط نودی که بر روی مسیر اصلی قرار گرفته است دریافت شود، نود دریافت کننده‌ی پیام، انتشار پیام دریافتی را متوقف خواهد کرد. بنابراین پیام تاکیدی مربوط به یک مسیر پشتیبان که توسط یکی از نودهای مسیر اصلی ارسال شده است، مسیر پشتیبانی در اطراف نود بعدی که برروی مسیر اصلی قرار گرفته ایجاد می‌کند. این مسیر پشتیبان در نهایت بعد از چند مرحله، به مسیر اصلی پیوند می‌خورد. ساختار مسیرهای شناسایی شده با استفاده از تکنیک بیان شده شبیه شکل (۳) می‌باشد.



شکل۳- مسیرهای مجزای جزئی

هدف اصلی پروتکل طراحی شده در [28] افزایش قابلیت اطمینان و تحمل‌پذیری در مقابل خرابی‌ها در شبکه‌های حسگر بی‌سیم می‌باشد. این پروتکل مسیرهای نود مجزایی را بین جفت نودهای منبع و مقصد شناسایی می‌کند. فرایند مسیریابی با ایجاد درختی توسط نود منبع در دو فاز مجزا انجام می‌شود. به‌این‌صورت که در فاز اول، درختی که ریشه آن نود منبع می‌باشد ایجاد شده و هر نود در شبکه با پیمایش این درخت مسیری را به سمت نود مقصد شناسایی می‌کند. تعداد مسیرهای مجزایی که در این فاز شناسایی می‌شوند برابر با تعداد شاخه‌های اصلی درخت می‌باشد. در فاز دوم، هر نود از طریق همسایگان خود که متعلق به شاخه‌های دیگری از درخت می‌باشند مسیرهای مجزای بیشتری را به سمت نود مقصد شناسایی می‌کند. این مسیرهای اضافه برای افزایش قابلیت اطمینان و تحمل‌پذیری در مقابل خرابی‌ها هنگام ارسال داده‌ها استفاده می‌شوند.

هدف از طراحی پروتکل H-SPREAD [29] افزایش امنیت و قابلیت اطمینان هنگام ارسال داده‌ها در شبکه‌های حسگر بی‌سیم می‌باشد. این پروتکل نسخه‌ی توسعه یافته‌ای از پروتکل ارائه شده در [28] است. در این پروتکل، پیام m به‌وسیله طرح تسهیم راز آستانه‌ای به چندین بخش S1,S2,... تقسیم شده و سپس از طریق چندین مسیر مجزا به سمت نود مقصد ارسال می‌شود. به‌دلیل ویژگی خاص طرح تسهیم راز آستانه‌ای[۱۳]، حتی اگر تعدادی از مسیرها، نودها و یا بخش‌های کوچکتر پیام خراب شوند پیام اصلی باز هم با استفاده از بخش‌های سالم باقی مانده قابل بازیابی می‌باشد.

AOMDV [30] نسخه‌ی چندمسیری از الگوریتم مسیریابی AODV [31] می‌باشد. این پروتکل سعی می‌کند مسیرهای لینک مجزا و نود مجزایی را شناسایی کند. تمامی جدول‌های مسیریابی در AOMDV برای حمایت از مسیریابی چندگانه شامل لیستی از چندین مسیر برای هر مقصد می‌باشند. تمام مسیرهای مربوط به یک مقصد دارای شماره توالی یکسانی هستند. این پروتکل برای جلوگیری از ایجاد چرخه در شبکه و نیز اطمینان از مجزا بودن مسیرها، دو مقدار فاصله تا نود منبع و آخرین پرش را برای هر مسیر ذخیره می‌کند. مقدار فیلد داده‌ای مربوط به فاصله تا نود منبع تا زمانی که یک مسیر برای شماره توالی بالاتری دریافت نشده باشد بدون تغییر باقی خواهد ماند. هر نود برای اطمینان از لینک مجزا بودن مسیرهای موجود در جدول مسیریابی، پیام درخواست مسیری را که دارای پرش بعدی مشابه و یا آخرین پرش مشابه با یکی از مسیرهای موجود در جدول مسیریابی باشد را حذف می‌کند. مشاهده می‌شود تا زمانی‌که تمامی نودها به این قانون پایبند باشند تمامی مسیرها با شماره توالی یکسان لینک مجزا خواهند بود.

MP-DSR [32] پروتکل مسیریابی چندگانه با هدف افزایش قابلیت اطمینان است. این پروتکل قابلیت اطمینان را به‌صورت احتمال انتقال موفقیت آمیز بین دو نود در دوره زمانی t_0 تا t_1 بیان می‌کند:

$$P(t) = 1 - \prod_{k \in K} (1 - p(k,t))$$

K مجموعه‌ای از مسیرهای نود مجزا بین منبع و مقصد می‌باشد. P(k,t) قابلیت اطمینان مسیر kام را مشخص می‌کند. میزان قابلیت اطمینان هر مسیر با ضرب میزان فعال بودن لینک‌های موجود در مسیر kام محاسبه می‌شود. به‌عبارت دیگر P(t) احتمال سالم بودن حداقل یک مسیر بین نود منبع و مقصد در دوره زمانی t را بیان می‌کند. این پروتکل ابتدا تعداد مسیرهای لازم (m_0) جهت برآورده سازی میزان قابلیت اطمینان مورد نیاز هر کاربرد را محاسبه می‌کند. فرایند مسیریابی توسط نود منبع، با ارسال m_0 کپی از پیام درخواست مسیر به m_0 همسایه از نود منبع شروع می‌شود. هنگامی که یک نود میانی پیام درخواست مسیری را دریافت کرد بررسی می‌کند آیا میزان قابلیت اطمینان محاسبه شده تا این لحظه، میزان قابلیت اطمینان مورد نظر را برآورده می‌سازد یا خیر. در این شرایط، m_0 کپی از آن را به همسایگان خود ارسال می‌کند و در غیر این صورت پیام دریافتی را ازبین‌می‌برد. هنگامی که نود مقصد تمامی پیام‌های درخواست مسیر را دریافت نمود، تعدادی از مسیرهای نود مجزا، که میزان قابلیت اطمینان لازم را برآورده می‌سازند، انتخاب می‌کند. این پروتکل به‌طور دوره‌ای قابلیت اطمینان انتها به انتها را کنترل می‌کند تا از کیفیت مسیرهای فعال مطمئن شود. هنگامی که قابلیت اطمینان موجود قابل قبول نباشد و یا تمامی مسیرها تا مقصد خراب شده باشند فرایند شناسایی مسیرهای جدید مجدداً آغاز می‌شود.

۴–۲– کاهش تأخیر

پروتکل مسیریابی چندگانه ارائه شده در [33] براساس پروتکل AOMDV می‌باشد. این الگوریتم از مکانیزم‌های پروتکل AOMDV برای یافتن مسیرهای نود مجزا استفاده می‌کند. با این تفاوت که اگر برای یک مقصد معین مسیری در جدول مسیریابی موجود باشد، مسیر بعدی برای آن مقصد را در صورتی به جدول مسیریابی اضافه می‌کند که: ۱) شماره توالی مربوط به آن پیام بزرگ‌تر یا مساوی با شماره توالی مسیر موجود در جدول مسیریابی باشد، ۲) اولین پرش در آن با تمامی مسیرهای موجود در جدول مسیریابی برای مقصد مورد نظر متفاوت باشد، ۳) تعداد پرش یکسانی با مسیر موجود در جدول مسیریابی داشته باشد. هنگامی‌که پیام درخواست مسیری با تعداد پرش کمتری توسط یکی از نودهای میانی دریافت شد تمامی مسیرهای موجود در جدول مسیریابی پاک شده و مسیر جدید به جدول اضافه می‌شود. اگر پیام درخواست مسیر تکراری که تمامی شرایط مربوط به نود مجزا بودن مسیرها را دارا می‌باشد توسط یکی از نودهای میانی دریافت شود، در صورتی‌که از نظر تعداد پرش‌ها نیز بهینه باشد آنگاه به جدول مسیریابی اضافه می‌شود. این پروتکل جهت توزیع ترافیک، از اطلاعات لایه دسترسی به رسانه برای کاهش تأخیر در ارسال داده‌ها استفاده می‌کند. در این الگوریتم، هنگام ارسال داده‌ها، هر نود بسته دریافتی را به نودی از جدول مسیریابی می‌دهد که زمان کمتری تا بیدار شدنش باقی مانده باشد و به‌این‌ترتیب تأخیر موجود در انتقال داده‌ها را کاهش می‌دهد.

نویسندگان در [34] نسخه‌ی بهبود یافته‌ای از الگوریتم مسیریابی چندگانه SMR [35] را با نام Split Equal-cast Multipath Routing (SEMR) ارائه داده‌اند. در این مقاله معیار مسیریابی جدیدی تحت عنوان میزان ازدحام موجود در هر مسیر ارائه شده است. درابتدا نود منبع مسیری را انتخاب می‌کند که حجم داده‌ی کمتری از طریق آن انتقال می‌یابد. سپس مسیر دوم را به‌گونه‌ای انتخاب خواهد کرد که تعداد نود مشترک کمتری با مسیر اول داشته باشد. بنابراین با استفاده از این معیار، مسیرهایی انتخاب می‌شوند که حجم داده‌ی کمتری از طریق آن‌ها انتقال می‌یابد. به‌این‌ترتیب از وقوع ازدحام در شبکه جلوگیری شده ضمن‌این‌که تأخیر ارسال داده‌ها نیز کاهش خواهد یافت.

۴–۳– کاهش میزان انرژی مصرفی در شبکه

نویسندگان در [36]، پروتکل مسیریابی چندگانه توزیع شده‌ای، را برای انتخاب چندین مسیر نود مجزا بین هر جفت نود منبع و مقصد ارائه داده‌اند. علاوه بر آن، الگوریتم توزیع باری نیز برای توزیع ترافیک برروی مسیرهای شناسایی شده در فاز شناسایی مسیرها ارائه نموده‌اند. الگوریتم توزیع بار ارائه شده، به نود منبع این امکان را می‌دهد که ترافیک موجود را بر اساس میزان انرژی موجود در هر مسیر و طول هر مسیر توزیع نماید.

این پروتکل جهت شناسایی مسیرهای نود مجزای موجود از سه فاز مجزا تشکیل شده است. در فاز اول نوعی پیام کنترلی در شبکه منتشر می‌شود. با انتشار این پیام در شبکه، هر نود از وضعیت نودهای موجود در همسایگی خود مطلع شده، ضمن این‌که نودهای مقصد و کمترین فاصله ممکن تا هر کدام از آن‌ها را نیز شناسایی خواهد کرد. فاز دوم زمانی شروع می‌شود که تعدادی از نودهای حسگر رخدادی را شناسایی نموده و قصد ارسال داده‌های جمع آوری شده به نود مقصد را دارند. در این فاز مسیرهای نود مجزایی بین هر جفت نود منبع و مقصد شناسایی شده، ضمن این‌که پس از شناسایی مسیرهای موجود، نود منبع نرخ داده‌ای مناسبی را به هر مسیر، بر اساس هزینه‌ی آن مسیر، انتساب می‌کند. فاز سوم بعد از فاز شناسایی مسیرها، برای انتقال داده‌ها به نود مقصد و نگهداری از مسیرهای شناسایی شده شروع می‌شود. از آنجایی که ممکن است

نرخ داده‌ی اولیه که به هر مسیر نسبت داده شده مناسب نباشد یا به مرور زمان میزان انرژی موجود در هر مسیر به‌طور قابل توجهی کاهش یابد، هنگام ارسال داده‌ها در هر مسیر، مقادیر کنترلی دیگری برای کنترل میزان انرژی موجود در مسیرهای فعال نیز انتقال می‌یابد. هنگامی که نود مقصد با توجه به این اطلاعات مطلع شد که هزینه مسیر اصلی از میزان معینی بیشتر شده نرخ داده‌ی نسبت داده شده به هر مسیر را براساس شرایط جاری مسیرها مجدداً تغییر می‌دهد. نود منبع میزان تأخیر مابین بسته‌های دریافتی خود را برای اطلاع از خرابی مسیرها، کنترل می‌کند. هنگامی که تأخیر یک مسیر بیش از حد معینی شد نود منبع احتمال می‌دهد که مسیر خراب شده باشد. بنابراین نرخ داده‌ای نسبت داده شده به هر مسیر را بر اساس شرایط جاری مسیرهای فعال موجود مجدداً تنظیم می‌کند. همچنین هنگامی که تنها دو مسیر فعال یا کمتر باقی مانده باشد نود مقصد پیامی را جهت شروع مجدد فاز شناسایی مسیرهای جدید به نود منبع ارسال می‌کند.

نویسندگان در [37] پروتکل ارائه شده در [28] را جهت توزیع متعادل ترافیک شبکه برروی مسیرهای شناسایی شده توسعه داده‌اند. این پروتکل با تولید اطلاعات بیشتری به هر مسیر وزن خاصی اختصاص داده و براساس آن میزان داده‌ای که می‌تواند از هر مسیر انتقال یابد را مشخص می‌کند. در این روش جهت انتساب وزن‌ها به هر مسیر و توزیع ترافیک از روش توزیع بار عمومی ارائه شده در [38] با کمی تغییرات جزئی استفاده شده است.

پروتکل Interference Minimized Multipath Routing (I2MR) [39]، با هدف افزایش گذردهی شبکه به‌واسطه توزیع بار بین چند مسیر مجزا که میزان تزویج کمتری دارند طراحی شده است. همچنین در هنگام انتقال همزمان داده‌ها روی مسیرهای مختلف، از یک روش کنترل ازدحام جهت افزایش گذردهی شبکه استفاده می‌شود. همانطور که قبلاً ذکر شد ویژگی‌های خاص کانال‌های بی‌سیم باعث می‌شوند مزایای حاصل از توزیع متعادل بار در شبکه‌های بی‌سیم قابل توجه نباشند. بنابراین برای داشتن توزیع بار مؤثر در شبکه‌های بی‌سیم، به‌دلیل تداخلات رادیویی موجود هنگام ارسال همزمان داده‌ها برروی مسیرهایی که از نظر فیزیکی نزدیک یکدیگر قرار گرفته‌اند، داشتن مسیرهای نود مجزا به‌تنهایی کافی نمی‌باشد.

در این پروتکل جهت مدل‌سازی تداخلات رادیویی در شبکه‌های بی‌سیم تک‌کانالی از گراف تداخل[۱۴] استفاده شده است. این گراف مشخص می‌کند کدام گروه از لینک‌های شبکه با یکدیگر در تداخل بوده و نمی‌توانند به‌طور همزمان برای انتقال داده‌ها استفاده شوند. با استفاده از این گراف معیار جدیدی به‌نام میزان تداخل کلی[۱۵] (TICF) برای مجموعه‌ای از مسیرهای نود مجزا به‌دست می‌آید. ایده اصلی این پروتکل به‌این‌صورت است که بعد از شناسایی اولین مسیر، ناحیه تداخلی این مسیر شناسایی شده و مسیرهای بعدی به‌گونه‌ای انتخاب می‌شوند که در این ناحیه قرار نگیرند. بعد از شناسایی مسیرها هنگام انتقال همزمان داده‌ها برروی مسیرهای شناسایی شده الگوریتم کنترل ازدحام استفاده شده در این پروتکل میزان داده قابل انتقال از طریق هر مسیر را به‌طور پویا به‌گونه‌ای تنظیم می‌کند که هر مسیر بیشترین مقدار داده ممکن را انتقال دهد.

در [40] تکنیک مسیریابی چندگانه‌ای جهت مصرف بهینه انرژی در شبکه‌های حسگربی‌سیم ارائه شده است. هدف اصلی در طراحی این پروتکل افزایش طول عمر شبکه به‌واسطه توزیع ترافیک برروی تعداد زیادی از نودهای شبکه می‌باشد. در این پروتکل ترافیک شبکه برروی نودهای موجود در مسیرهای مختلف بین هر جفت نود منبع و مقصد با توجه به میزان انرژی باقی مانده در آن‌ها و قدرت سیگنال دریافتی توسط آن‌ها تقسیم می‌شود. در نتیجه ترافیک بیشتری به مسیرهایی که کمتر مورد استفاده قرار گرفته‌اند اختصاص می‌یابد و به مسیرهایی که بیشتر مورد استفاده قرار گرفته‌اند میزان ترافیک کمتری اختصاص خواهد یافت. در این پروتکل، فاز شناسایی مجدد مسیرهای جدید زمانی شروع می‌شود که تعداد مسیرهای فعال بین هر جفت نود منبع و مقصد کمتر یا مساوی دو مسیر باشد. در غیر این صورت با خرابی یک مسیر، ترافیک شبکه بین مسیرهای فعال موجود مجدداً توزیع می‌شود.

Split Multipath Routing [35]، نسخه‌ی چندمسیری از پروتکل مسیریابی DSR [41] می‌باشد. در این پروتکل هر نود منبع، از دو مسیر مجزا برای ارسال بسته‌ها در شبکه به‌طور همزمان استفاده می‌کند. در پروتکل SMR پیام‌هایی که توسط نودهای منبع برای درخواست مسیر ارسال شده‌اند تنها توسط نود مقصد پاسخ داده خواهند شد. در حالی‌که نودهای میانی اجازه‌ی چنین کاری را با استفاده از اطلاعات محلی نخواهند داشت. همین امر به نود مقصد اجازه می‌دهد که پیام‌های درخواست مسیر بیشتری را دریافت کند. بنابراین می‌تواند از بین آن‌ها دو مسیر مجزایی که دارای نودها یا لینک‌های مشترک کمتری باشند را انتخاب نماید. اما این روش سربار مربوط به فرایند شناسایی مسیر را افزایش می‌دهد. در این پروتکل، نود مقصد، مسیری را که از طریق آن اولین پیام درخواست مسیر را دریافت نموده به‌عنوان مسیری با کمترین میزان تأخیر انتخاب می‌کند و مسیر دیگری که تعداد نود یا لینک مشترک کمتری با مسیر اول دارد را به‌عنوان دومین مسیر انتخاب می‌کند. هنگامی که یک مسیر در حال استفاده خراب شود، تمامی مسیرهای

موجود در جدول مسیریابی که دارای نود مشترکی با مسیر خراب شده می‌باشند بدون توجه به نود مقصدشان حذف می‌شوند. اگر سایر مسیرها قابل استفاده باشند، فرایند مسیریابی جدیدی می‌تواند برای یافتن مسیرهای جایگزین همان لحظه شروع شود یا تا زمان خراب شدن مسیر دوم به تأخیر افتد. نتایج شبیه‌سازی نشان می‌دهند که پروتکل SMR از لحاظ میزان تأخیر و بسته‌های گم شده کارآمدتر از پروتکل DSR می‌باشد، ضمن این‌که اگر فرایند جستجوی مسیر جدید بعد از خرابی هر دو مسیر شروع شود، سربار کنترلی کمتری تحمیل خواهد شد.

در جدول (۱) پروتکل‌های مسیریابی چندگانه بیان شده با یکدیگر مقایسه شده‌اند.

جدول ۱- طبقه‌بندی تعدادی از الگوریتم‌های مسیریابی چندگانه

نوع کاربرد	نحوه نگهداری مسیرها	نحوه توزیع ترافیک	انتخاب‌گر مسیرها	تعداد مسیرها	نوع مسیرها	پروتکل مسیریابی چندگانه
تحمل‌پذیری در مقابل خرابی‌ها	پس از خرابی آخرین مسیر	یک مسیر	نودهای میانی	N	مجزای جزئی	Braided Multi-Path Routing [26]
تحمل‌پذیری در مقابل خرابی‌ها	خرابی آخرین مسیر	یک مسیر	نودهای میانی و نود مقصد	N	لینک مجزا (قابل توسعه به نود مجزا)	AOMDV [30]
بهبود قابلیت اطمینان	زمانی که قابلیت اطمینان مورد نظر برآورده نشود.	-	نود مقصد	N	نود مجزا	MP-DSR [32]
تحمل‌پذیری در مقابل خرابی‌ها	پس از خرابی آخرین مسیر	یک مسیر	نودهای میانی	N	نود مجزا	N-to-1 Multi Path Routing [28]
بهبود قابلیت اطمینان و امنیت	پس از خرابی آخرین مسیر	چندین مسیر	نودهای میانی	N	نود مجزا	H-SPREAD [29]
کاهش تأخیر	پس از خرابی آخرین مسیر	چندین مسیر	نود مقصد	N	نود مجزا	[33]
کاهش تأخیر و ازدحام	پس از خرابی یکی از مسیرها	چند مسیر	نود مقصد	۲(قابل توسعه)	نود مجزا	SEMR [34]
کاهش میزان انرژی مصرفی	پس از خرابی آخرین مسیر	چند مسیر	نود مقصد	۲(قابل توسعه)	نود مجزا	SMR [35]
کاهش میزان انرژی مصرفی	تنها دو مسیر یا کمتر فعال باشند	چند مسیر	نود مقصد	N	نود مجزا	[36]
کاهش میزان انرژی مصرفی	پس از خرابی آخرین مسیر	چند مسیر	نودهای میانی	N	نود مجزا	[37]
کاهش میزان انرژی مصرفی و افزایش گذردهی شبکه	پس از خرابی ۲ مسیر	چند مسیر	نودهای میانی	۳	نود مجزا	I2MR [39]
کاهش میزان انرژی مصرفی	تنها دو مسیر یا کمتر فعال باشند	چند مسیر	نود منبع	N	نود مجزا	[40]

۵– شبیه‌سازی و ارزیابی شبکه

۵–۱– ابزارهای شبیه‌سازی

ابزارهایی که در مدل‌سازی و شبیه‌سازی شبکه‌های حسگربی‌سیم به‌کار می‌روند دارای محدوده وسیعی می‌باشند. این ابزارها می‌توانند نرم‌افزارهای تحلیلی مثل Mathematica و Matlab باشند و یا نرم‌افزارهای شبیه‌سازی خاصی باشند که بر جنبه‌های خاصی از شبکه تأکید دارند. در میان ابزارهایی که استفاده متداول‌تری دارند، سه دسته اصلی را می‌توان برشمرد. این تقسیم‌بندی در جدول (۲) نشان داده شده است.

جدول ۲- ابزارهای شبیه‌سازی متعارف برای شبکه‌های حسگر بی‌سیم

نمونه نرم‌افزار	نوع شبیه‌سازی
TOSSIM [42]	شبیه‌سازی سیستم‌عامل نودها
PTOSSIM [43]	
OMNeT++ [44]	شبیه‌سازهای شبکه و سیستم-های گسسته-پیشامد
NS-2 [45]	
GloMoSim [46]	
Avrora [47]	شبیه‌سازهای سطح دستورالعمل
ATEMU [48]	
Worldsens [49]	
Sunflower [50]	
Ptolemy [51]	سایر شبیه‌سازها
Empro [52]	
SenQ [53]	

اکثر شبیه‌سازهایی که به شبیه‌سازی سیستم‌عامل می‌پردازند (مانند TOSSIM و PTOSSIM) تنها مخصوص شبیه‌سازی عملیات سیستم‌عامل خاصی (TinyOS) هستند و نمی‌توان آن‌ها را برای شبیه‌سازی سایر سیستم‌عامل‌ها به‌کار گرفت. همچنین شبیه‌سازهای دستورالعمل بخاطر فراهم کردن جزئیات سطح پایین زمان‌بندی و توان مصرفی، دارای سرعت پایینی هستند. اما در مقایسه با شبیه‌سازهای سطح سیستم‌عامل و شبیه‌سازهای سطح دستورالعمل، شبیه‌سازهای شبکه و شبیه‌سازهای سیستم‌های گسسته-پیشامد دارای کاربرد وسیع‌تری می‌باشند. این ابزارها به‌ویژه برای شبیه‌سازی و ارزیابی پروتکل‌های مسیریابی کاربرد دارند. اما این ابزارها بر خلاف ابزارهای شبیه‌سازی سیستم‌عاملی هیچ‌گونه مدل‌سازی در مورد محیط اطراف نودها، محاسبات درونی نودها، کانال ارتباطات بی‌سیم و توان مصرفی نودها در نظر نمی‌گیرند و تنها جنبه‌های اولیه تبادل پیام در این گونه سیستم‌ها را شبیه‌سازی می‌کنند. برای مثال نرم افزار OMNeT++ مفاهیمی از قبیل نودهای تشکیل دهنده شبکه، وقایعی که نودها دریافت و ارسال می‌کنند، و ابزارهایی برای جمع‌آوری اطلاعات و آمار نودهای در حال کارکرد شبکه را فراهم می‌کند. کاربری که می‌خواهد یک شبکه حسگربی‌سیم را مدل کند باید به ساخت مدلی از کانال، افت سیگنال، خطای بیت‌ها و سایر موارد بپردازد. برای سهولت این امر، می‌توان ازINET Framework و یا Mobility Framework استفاده نمود. این کتابخانه‌ها به توسعه‌ی قابلیت‌های OMNeT++ در زمینه شبیه‌سازی شبکه‌های ثابت و متحرک کمک می‌کنند. اگرچه Mobility Framework برای شبیه‌سازی شبکه‌های موردی معرفی شد، اما دارای قابلیت‌هایی در زمینه مدل‌سازی لایه‌های شبکه‌های بی‌سیم می‌باشد که می‌تواند برای مدل‌سازی شبکه‌های حسگر بی‌سیم نیز به‌کار گرفته شود.

۵–۲– معیارهای ارزیابی عملکرد شبکه

در جدول (۳) معیارهای مرتبط با ارزیابی عملکرد شبکه را بیان کرده‌ایم. در ادامه به بررسی این معیارها در رابطه با مسیریابی چندگانه خواهیم پرداخت.

۵–۲–۱– طول عمر شبکه

با استفاده از این معیار می‌توان مدت زمان پایداری شبکه را محاسبه نمود. در مقالات مختلف تعاریف گوناگونی از طول عمر شبکه ارائه شده است. اما در بسیاری از مقالات این پارامتر نشانگر زمانی می‌باشد که انرژی اولین نود حسگر تمام می‌شود. گروه دیگری از مقالات، این پارامتر را به‌عنوان زمانی که انرژی درصد مشخصی از نودها تمام می‌شود معرفی کرده‌اند.

۵–۲–۲– میانگین میزان توان مصرفی در هر نود

با استفاده از این معیار می‌توان میانگین انرژی مصرفی به‌وسیله هر نود برای ارسال داده‌ها از نود منبع به نود مقصد را محاسبه نمود. این معیار را می‌توان به صورت زیر محاسبه کرد:

$$E_a = \frac{\sum_{i=1}^{M}(e_{i,init} - e_{i,res})}{M \sum_{i=1}^{S} dataN_j}$$

در این فرمول پارامتر M بیانگر تعداد نودهای شبکه می‌باشد. پارامترهای $e_{i,init}$ و $e_{i,res}$ به‌ترتیب میزان انرژی اولیه و باقی‌مانده در نود i ام را نشان می‌دهند. پارامتر S حاوی تعداد نودهای مقصد بوده و پارامتر N_j نیز میزان داده دریافتی توسط نود مقصد j ام را تعیین می‌کند.

نتایج شبیه‌سازی بسیاری از پروتکل‌های مسیریابی ارائه شده حاکی از این حقیقت است که هرچه تعداد نودهای شبکه افزایش

یابد به همان نسبت توانایی پروتکل مسیریابی چندگانه برای شناسایی مسیرهای بیشتر بالا خواهد رفت. بنابراین میزان ترافیک ارسالی توسط هر نود کاهش یافته و همین امر میانگین انرژی مصرفی در هر نود را کاهش می‌دهد.

جدول ۳- پارامترهای مورد استفاده در ارزیابی پروتکل‌های شبکه‌های حسگربی‌سیم

پارامتر	توضیح	مقادیر
طول عمر شبکه	عموماً زمان اتمام انرژی اولین نود شبکه است.	چندین ماه تا چندین سال
توان مصرفی هر نود	به شدت به کارکرد بخش رادیویی هر نود وابسته می‌باشد. بهینه‌سازی پروتکل‌های مسیریابی و دسترسی به رسانه توان مصرفی را کاهش می‌دهد.	بر حسب mW و یا mJ بیان می‌شود
نرخ دریافت بسته‌ها	درصد نسبت بسته‌های دریافتی به بسته‌های ارسالی. به پروتکل مسیریابی و پروتکل‌های لایه اتصال داده‌ها وابسته می‌باشد.	درصدی از بسته‌های ارسالی
تأخیر انتها به انتها	تأخیر دریافت از زمان ارسال تا دریافت در مقصد. به پروتکل مسیریابی و پروتکل دسترسی به رسانه وابستگی زیادی دارد.	از میلی ثانیه تا چندین ثانیه و یا حتی دقیقه (بر حسب کاربرد)
تأخیر هر جهش	مقدار تأخیر ارسال بسته‌ها در هر جهش. به پروتکل دسترسی به رسانه وابستگی زیادی دارد.	عموماً بر حسب میلی ثانیه و یا ثانیه

۵-۲-۳- نرخ دریافت بسته‌ها

با استفاده از این معیار می‌توان نسبت بین تعداد بسته‌های ارسالی توسط نود منبع و تعداد بسته‌های دریافتی توسط نود مقصد را نشان داد. این معیار نرخ گم‌شدگی حاصل از هر پروتکل مسیریابی چندگانه را نشان می‌دهد. در حالت ایده‌آل مقدار این پارامتر برابر یک می‌باشد. اگر مقدار این معیار به‌طور قابل توجهی زیر حد ایده‌آل قرار گیرد نشان دهنده اشکالاتی در طراحی پروتکل مسیریابی است. در حالی که اگر این مقدار بالاتر از حد ایده‌آل باشد به‌این معنا است که نود مقصد تعداد زیادی از بسته‌ها را بیش از یک‌بار دریافت کرده است که این امر در شبکه‌های حسگربی‌سیم خوشایند نیست، چراکه باعث می‌شود منابع فعال شبکه به‌سرعت مصرف شده و طول عمر شبکه به‌طور قابل توجهی کاهش یابد.

۵-۲-۴- تأخیر

با استفاده از معیار تأخیر می‌توان میانگین زمان سپری شده برای ارسال داده‌ها از نود منبع به نود مقصد را اندازه‌گیری کرد. نتایج شبیه‌سازی بسیاری از پروتکل‌های مسیریابی چندگانه ارائه شده نشان می‌دهند که تأخیرهای موجود در ارسال داده‌ها را می‌توان با استفاده از تکنیک‌های مسیریابی چندگانه بطور قابل توجهی کاهش داد.

۵-۳- پارامترهای شبیه‌سازی

با در نظر گرفتن ابزار شبیه‌سازی OMNeT++، کاربر باید پارامترهای مختلفی را در شبیه‌سازی شبکه به‌کار بگیرد تا نتایج قابل اعتمادی را به همراه داشته باشد. از جمله مواردی که تأثیر زیادی برروی سرعت شبیه‌سازی و نتایج شبیه‌سازی دارد تعداد نودها و مساحت محیط می‌باشد. با افزایش تعداد نودها و یا کاهش مساحت محیط، چگالی شبکه زیاد شده، تعداد همسایگان هر نود افزایش می‌یابد و پروتکل مسیریابی تحت تأثیر قرار خواهد گرفت. اثر مشابهی در هنگام افزایش توان مصرفی هر نود قابل مشاهده است. اما برای آن‌که بتوان اثرات چگالی را برروی کارایی پروتکل مسیریابی بررسی نمود، معمولاً توان مصرفی ثابت در نظر گرفته می‌شود و تعداد نودها و یا مساحت محیط تغییر می‌کند.

برای آن‌که بتوان نودها را در محیط قرار داد سه توپولوژی وجود دارد: خطی، مشبک و اتفاقی. از آنجایی که پروتکل مسیریابی چندمسیری برروی توپولوژی خطی کاربردی ندارد لذا این توپولوژی در شبیه‌سازی استفاده نمی‌شود. از میان دو توپولوژی مشبک و اتفاقی، کابر می‌تواند هر دو و یا یکی را با توجه به کاربرد شبکه انتخاب نماید. در صورت استفاده از توپولوژی اتفاقی باید شبیه‌سازی‌های گسترده‌ای را انجام داد و میانگین نتایج شبیه‌سازی را به عنوان نتایج اصلی درنظر گرفت.

برای آن‌که بتوان محیط واقعی قرارگیری نودها را مدل نمود و تأثیرات کانال بی‌سیم را در شبیه‌سازی درنظر گرفت، نیازمند مدل‌سازی دقیق کانال هستیم. در [54] و [55] روش‌های کاربردی مدل‌سازی کانال بی‌سیم ارائه شده‌اند. می‌توان از مدل‌های ارائه شده در این مقالات برای مدلسازی دقیق کانال بی‌سیم استفاده نمود. اما در شبیه‌سازی محیط و کانال بی‌سیم، به پارامترهایی برمی‌خوریم که انتخاب دقیق مقادیر آن‌ها در بدست آوردن نتایج قابل اعتماد ضروری است. جدول (۴) این پارامترها را نشان می‌دهد. در این جدول مقادیر متعارف هر پارامتر در شبکه‌های حسگر بی‌سیم داده شده است.

جدول ۴- پارامترهای شبیه سازی

توضیح	پارامتر
نوع مدولاسیون به‌کار گرفته شده در رادیو (FSK, ASK, PSK,…)	Modulation
نوع کدگذاری سیگنال‌های ارسالی (Manchester,NRZ, 4B5B, SECDEC)	Encoding
توان ارسالی رادیو برای MICA2: (-20 dBm< P_t < 5 dBm)	Output Power (P_t)
اندازه فریم‌های داده (شامل اندازه داده+هدرهای MAC و Physical)	Frame Length
نرخ تضعیف سیگنال	Path Loss Exponent (*n*)
بستگی به نوع رادیو و محیط دارد (-110 dBm, -105 dBm,…)	Noise Floor
فاصله مرجع (معمولاً ۱ متر)	D_0
-55 dB	PL_{D0}

جدول ۵- مقادیر قابل استفاده در شبیه‌سازی یک شبکه حسگر بی‌سیم

پارامترهای رادیو			
Modulation	FSK	Encoding	Manchester
Output Power	-7 dBm	Frame	50 Byte
پارامترهای رسانه انتقال			
Path Loss Exponent(n)	4	PL_{D0}	55 dBm
Noise Floor	-105 dBm	D_0	1 m

با توجه با آزمایشات عملی انجام شده، برای شبکه‌هایی که در محیط‌های داخلی کار می‌کنند، مقدار n باید حدوداً برابر ۳ باشد ($2.67<n<3.23$) اما برای محیط‌های خارجی مقدار ۴،۷ درنظر گرفته می‌شود ($4.3<n<5.1$). اندازه هدرهای لایه MAC و لایه فیزیکی در MicaZ برابر ۱۶ بایت است، بنابراین با درنظر گرفتن طول داده باید اندازه این دو هدر را به طول داده اضافه نمود تا اندازه هر فریم حاصل شود. با توجه به آن‌که توان ارسالی نودها را در شبکه‌های حسگر بی‌سیم مقدار کمی درنظر می‌گیرند، مقدار توان ارسالی بین 0 dBm تا -20 dBm قابل قبول می‌باشد. در جدول (۵) برای هر یک از پارامترهای شبیه‌سازی مقداری معرفی شده است. این مقادیر با یک کاربرد عمومی از شبکه حسگر بی‌سیم مطابقت دارد و می‌تواند منجر به نتایج قابل قبولی شود

۶- نتیجه‌گیری

در این مقاله، روش‌های مسیریابی چندگانه را به‌عنوان تکنیکی برای بهبود کیفیت خدمات در شبکه‌های حسگر بی‌سیم معرفی کردیم. با توجه به مزایای حاصل از روش‌های مسیریابی چندگانه، تحقیقات گسترده‌ای در زمینه توسعه این نوع پروتکل‌ها در حال انجام است. با این وجود، هنوز مشکلات عمده‌ای (از قبیل تداخلات رادیویی بین مسیرهای مختلف) در رابطه با به‌کارگیری این تکنیک‌ها در شبکه‌های بی‌سیم وجود دارد که به اندازه کافی مورد بررسی قرار نگرفته‌اند. همچنین در پروتکل‌هایی که تاکنون طراحی شده‌اند هزینه‌ی هر لینک براساس فاصله تا مقصد و یا سطح انرژی باقی‌مانده در هر نود محاسبه می‌شود. اما می‌توان برای بهبود کارایی پروتکل‌های مسیریابی چندگانه و افزایش دقت در ارزیابی هزینه‌ی هر لینک، از اطلاعات لایه‌ی اتصال داده و لایه‌ی فیزیکی استفاده نمود، در حالی‌که برای تحقق این امر نیازمند تحقیقات گسترده‌ای در زمینه‌ی روش‌های بهینه‌سازی بین لایه‌ای[۱۶] می‌باشیم.

به‌دلیل محدودیت‌های فضایی، در این مقاله تنها مجال یافتیم اصول اصلی مربوط به پروتکل‌های مسیریابی چندگانه را بیان کنیم. در این راستا، تکنیک‌های اصلی استفاده شده جهت شناسایی چندین مسیر بین هر جفت نود منبع و مقصد و نیز معیارهای در نظر گرفته شده در طراحی پروتکل‌های مسیریابی چندگانه ارائه شدند.

۷- مراجع

[1] J.Heidemann, R.Govindan; **"An Overview of Embedded Sensor Networks",** Springer, 2004.

[2] K.Karenos, V.Kalogeraki; **"Real-Time Traffic Management in Sensor Networks"**, Proceedings of the 27th IEEE International Real-Time Systems Symposium, pp. 422-434, Dec 2006.

[3] LF. Akyildiz, W. su, Y. Sankarasubramaniam, E.Cayirci, **"A Survey on Sensor Networks"** Communications Magazine IEEE, Vol. 40, No. 8, pp. 102-114, Aug 2002.

[4] J A. Stankovic, TE. Abdelzaher, C. Lu, L. Sha, JC. Hou; **"Real-Time Communication and Coordination in Embedded Sensor Networks",** in Proceedings of the IEEE, Vol. 91, No. 7, pp. 1002-1022, July 2003.

[5] M.Younis, k.Akkaya, M.Eltoweissy, A.Wadaa; **"On Handling QoS Traffic in Wireless sensor Network",** IEEE, Jan 2004.

[6] Y.li, Ch.Shue Chen, Ye.Song, Z.Wang; **"Real-Time QoS Support in Wireless Sensor Networks: A Survey",** In 7th IFAC International Conference on Fieldbuses & Networks in Industrial & Embedded Systems, 2007.

[7] K. Akkaya, M.Younis; **"An Energy-Aware QoS Routing Protocol for Wireless Sensor Networks"** IEEE, pp. 710- 715, May 2003.

[8] L.Buttyan, G.Acs; **"A Taxonomy of Routing Protocols for Wireless Sensor Networks"**, Hiradastechnika, January 2007.

[9] JN Al-Karaki, AE Kamal , **"Routing techniques in wireless sensor networks: a survey",** Wireless Communications, IEEE, Vol. 11, No. 6, pp. 6-28, Dec 2004.

[10] K.l Akkaya,M. Youni; **"A survey on routing protocols for wireless sensor networks"**, ScienceDirect, Vol. 3, No. 3, pp. 325-349, May 2005.

[11] W. Lou, W.Liu, Y. Zhang; **"Performance Optimization using Multipath Routing in Mobile Ad Hoc and Wireless Sensor Networks"**, COMBINATORIAL OPTIMIZATION IN COMMUNICATION NETWORKS, 2005.

[12] M. Yabandeh, H. Mohammadi, N. Yazdani; **"Multipath Routing in Mobile Ad Hoc Networks: Desing Issues",** in 12 international CSI Computer Conference(CSICC07), Tehran, February 2007.

[13] J. Tsai, T.Moors; **"A Review of Multipath Routing Protocols: From Wireless Ad Hoc to Mesh Networks",** in Proccedings of the ACoRN Early Career Researcher Workshop on, Australia, 2006.

[14] D.Chen, K.Varshney; **"QoS support in wireless sensor networks: A survey",** International Conference on Wireless Networks, 2004.

[15] F.Xia; **"QoS Challenges and Opportunities in Wireless Sensor/ Actuator Networks"**, Diversity Preservation International (MDPI), Vol. 8, pp. 1099-1110, February 2008.

[16] Chih-Lin, R. D. Gitlin, J. E. Mazo E. Ayanoglu; **"Diversity coding for transparent self-healing and fault-tolerant communication networks",** IEEE, Vol. 41, pp. 1677-1686, 1993.

[17] S Dulman, T Nieberg, J Wu, P Havinga; **"Trade-off between Traffic Overhead and Reliability in Multi-path Routing for Wireless Sensor Networks"**, WCNC Workshop, 2003.

[18] Y. H.Wang, H. Z. Lin Sh. M. Chang; **"Interference on Multipath QoS Routing for Ad Hoc Wireless Network"** IEEE, Proceedings of the 24th International Conference on Distributed Computing Systems Workshops - W7: EC (ICDCSW'04), Vol. 7, pp. 104- 109, March 2004.

[19] Z. J. Haas, P. Sholander, S. S. Tabrizi M. R. Pearlman; **"On the impact of alternate path routing for load balancing in mobile ad hoc networks",** 1st ACM international symposium on Mobile ad hoc networking & computing, Boston, Massachusetts: IEEE Press, 2000.

[20] K. Jain, J.Padhye, V. N. Padmanabhan; **"Impact of interference on multi-hop wireless network performance"**, in MobiCom 03: Proceedings of the 9th annual international conference on Mobile computing and networking, ACM, pp. 66-80, 2003.

[21] K.Wu, J.Harms; **"Performance study of a multipath routing method forWireless mobile ad hoc networks",** 9th international symposium on modeling, analysis and simulation of computer and telecommunication system(MAS-COTS 01), August 2001.

[22] S. Toy, S. Bandyopadhyay, T. Ueda, S. Tanaka D. Saha; **"An adaptive framework for multipath routing via maximally zone-disjoint shortest paths in ad hoc wireless networks with directional antenna"**, Global Telecommunications Conference, IEEE, 2003.

[23] B. Yan, H.Gharavi; **"Multi-Path Multi-Channel Routing Protocol",** Proceedings of the Fifth IEEE International Symposium on Network Computing and Applications, pp. 27 - 31 , 2006.

[24] S. Roy, s. Bandyopadhyay, T. Ueda, K. Hasuike; **"Multipath routing in ad hoc wireless networks with omni directional and directional antena: A comprative study",** in IWDC 02: proceedings of 4th international Workshop on Distributed Computing, Mobile and Wireless Computing. Springer, pp. 184-191, 2002.

[25] W. H. Tam, Y. C. Tseng; **"Joint Multi-Channel Link Layer and Multi-Path Routing Design for Wireless Mesh Networks",** INFOCOM 26th IEEE International Conference on Computer Communications. IEEE, pp. 2081-2089, May 2007.

[26] D Ganesan, R Govindan, S Shenker, D Estrin; **"Highly-resilient, energy-efficient multipath routing in wireless sensor networks",** ACM SIGMOBILE Mobile Computing and Communications Review, Vol. 5, No. 4, pp. 11-25, October 2001.

[27] C.Intanagonwiwat, R.Govindan ,D. Estrinl; **"Directed diffusion: a scalable and robust communication paradigm for sensor**

of IEEE transaction of mobile computing, Vol. 7, No. 9, pp. 1124-1137, april 2008.

[40] R.Vidhyapriya, P T.Vanathi; **"Energy Efficient Adaptive Multipath Routing for Wireless Sensor Networks",** IAENG International Jornal of Computer Sience, August 2007.

[41] D. B. Johnson, D. A. Maltz, Y. C. Hu and J.G. Jetcheva; **"The dynamic source routing protocol for mobile Ad Hoc networks",** in IETF Internet Draft, Oct 1999.

[42] P. Levis, N. Lee, M.Welsh, D. Culler; **"Tossim: accurate and scalable simulation of entire tinyos applications",** In SenSys '03: Proceedings of the 1st international conference on Embedded networked sensor systems. ACM, p. 126–137, 2003.

[43] V. Shnayder, M. Hempstead, B. Chen, G. V. Allen, and M.Welsh; **"Simulating the power consumption of large-scale sensor network applications",** In SenSys '04: Proceedings of the, p. 188–200, 2004.

[44] A. Varga; **"The OMNeT++ Discrete Event Simulation System"**, In Proceedings of the European Simulation Multiconference, ESM, 2001.

[45] **"ns-2 Network Simulator",** http:// www.isi.edu / nsnam/ns/, ISI , (2008, March)

[46] X. Zeng, R. Bagrodia, M. Gerla; **"Glomosim: a library for parallel simulation of large-scale wireless networks",** ACM SIGSIM Simulation Digest, Vol. 28, No. 1, pp. 154 - 161, 1998.

[47]]B. L. Titzer, D. K. Lee, J .Palsberg, **"Avrora: scalable sensor network simulation with precise timing",** In IPSN '05: Proceedings of the 4th international symposium on Information processing in sensor networks, IEEE, pp. 477- 482, April 2005.

[48] J. Polley, D. Blazakis, J. McGee, D. Rusk, J. S. Baras, **"ATEMU: a fine-grained sensor network simulator"** In First Annual IEEE Communications Society Conference on Sensor and Ad Hoc Communications and Networks, p. 145–152, Oct 2004.

[49] A. Fraboulet, G. Chelius, E. Fleury; **"Worldsens: development and prototyping tools for application specific wireless sensors networks",** In IPSN'07: Proceedings of the 6th international conference on Information processing in sensor networks, ACM, p. 176–185, April 2007.

[50] P. Stanley-Marbell, D. Marculescu; **"Sunflower: Full-System, Embedded Microarchitecture Evaluation",** 2nd European conference on High Performance **networks",** proceeding of ACM MobiCom, pp. 56-67, August 2000.

[28] W.Lou, **"An efficient N-to-1 multipath routing protocol in wireless sensor networks",** IEEE International Conference on Mobile Adhoc and Sensor Systems, Vol. 7, No. 7, Nov 2005

[29] W.Lou, Y.K, **"H-SPREAD: a hybrid multipath scheme for secure and reliable data collection in wireless sensor"** IEEE, vol. 55, no. 4, pp. 1320 - 1330, July 2006.

[30] M. Marina, S. Das, **"On-demand multipath distance vector routing in ad hoc networks",** Ninth International Conference for Network Protocols (ICNP), Nov 2001.

[31] C. E. Perkins, E. m. Royer, and S. R. Dos, **"Ad hoc on Demand Distance Vector (AODV) Routing",** IETF Internet Draft, July 2000.

[32] R Leung, J Liu, E Poon, ALC Chan, B Li, **"MP-DSR: a QoS-aware multi-path dynamic source routing protocol for wireless ad-hoc networks",** Local Computer Networks, IEEE, pp. 132-141, 2001.

[33] P.Hurni,T.Braun, **"Energy-Efficient Multi-path Routing in Wireless sensor network,"** Springer, Vol. 5198, pp. 72-85, September 2008.

[34] Ch.Ahn, J.Shin, E-N.Huh, **"Enhanced Multipath Routing Protocol Using Congestion Metric in Wireless Ad Hoc Networks"** International Federation for Information Processing, pp. 1089-1097, 2006.

[35] S.J.Lee, M.Gerla, **"Split Multipath Routing with Maximally Disjoint paths in Ad hoc Networks"**, IEEE International Conference on Communications, Vol. 10, pp. 3201-3205, 2001.

[36] YM. Lu, V.W. S.Wong; **"An energy-efficient multipath routing protocol for wireless sensor networks",** International Journal of Communication Systems, Vol. 20, No. 7, pp. 747-766, July 2007.

[37] J.R. Gallardo, A. Gonzalez, L. Villasenor-Gonzalez, J. Sanchez; **"Multipath routing using generalized load sharing for wireless sensor networks",** ACTA, 2007.

[38] K.C.Leung, VO.K.Li; **"Generalized load sharing for packet-switching networks. I. Theory and packet-based algorithm",** Parallel and Distributed Systems, IEEE , Vol. 17, No. 7, pp. 694 - 702, July 2006.

[39] JY Teo,Y Ha,and Ch-kh.Tham; **"Interfrence-Minimized Multipath Routing with Congestion Control in Wireless Sensor Network for High-Rate Streaming",** Journal

Embedded Architectures and Computers (HiPEAC 2007) / Lecture Notes on Computer Science 4367, p. 168–182, 2007.

[51] P. Baldwin, S. Kohli, E. A. Lee, X. Liu, Y. Zhao; **"Modeling of sensor nets in Ptolemy II",** In IPSN '04: Proceedings of the third international symposium on Information processing in sensor networks, ACM, p. 359–368, April 2004.

[52] C. Park, P. H. Chou; **"Empro: an environment/energy emulation and profiling platform for wireless sensor networks"**, Third Annual IEEE Communications Society Conference on Sensor and Ad Hoc Communications and Networks, p. 158–167, 2006.

[53] M. Varshney, D. Xut, M. Srivastavat, R. Bagrodiat; **"Senq: a scalable simulation and emulation environment for sensor networks",** In IPSN '07: Proceedings of the 6th international conference on Information processing in sensor networks, ACM, p. 196–205, April 2007.

[54] M. Zuniga and B. Krishnamachari; **"Analyzing in the transitional region in low power wireless links",** IEEE SECON'04, 2004.

[55] B. Krishnamachari and M. Zúñiga Zamalloa; **"An Analysis of unreliability and asymmetry in low- power wireless links"** ACM Transactions on Sensor Networks (TOSN), Vol. 3, No. 2, 2007

۸– پی‌نوشت‌ها

1- Wireless Sensor Network
2- Quality of Service
3- Multi-Path Routing
4- Data Aggregation
5- Congestion Control
6- Route Coupling
7- Interference
8- Correlation Factor
9- Throughput
10- On-demand Routing
11- Hop
12- Enforcement Message
13- Threshold Secret Sharing
14- Conflict Graph
15- Total Interference Correlation Factor
16- Cross-Layer Optimization