مسیریابی چندمقصدی شبکه‌های سیار بدون زیرساخت با استفاده از دسته‌بندی

متین باقرپور
دانشجوی دکتری مهندسی صنایع، دانشگاه تربیت مدرس
mbagher@modares.ac.ir
محمد مهدی سپهری
دانشیار مهندسی صنایع، دانشگاه تربیت مدرس
sepehri@modares.ac.ir
مهدی شریف‌یزدی
دانشجوی دکتری مهندسی صنایع، دانشگاه صنعتی شریف
sharifyazdi@mehr.sharif.edu

واژه‌های کلیدی

شبکه سیار بدون زیرساخت_ مسیریابی چند مقصدی _ دسته‌بندی _ گراف احتمالی

چکیده

یکی از مهم‌ترین مسائل در شبکه‌های سیار بدون زیرساخت، مسیریابی در حالت ترافیک چندمقصدی است. در این شبکه‌ها مسیریاب ثابتی وجود ندارد و گره‌ها می‌توانند جابه‌جا شوند. به دلیل نبود زیرساخت مرکزی، اطلاعات لازم برای مسیریابی در یک محل متمرکز نیست و لذا الگوریتمی برای یافتن جواب بهینه یا نزدیک به بهینه وجود ندارد. بلکه اکثر روش‌های مسیریابی موجود از نوع الگوریتم‌های آزمند هستند که سعی می‌کنند گره بعدی مسیر را تنها با استفاده از اطلاعات گره یا گره‌های قبلی انتخاب شده تعیین کنند. در این مقاله ابتدا با استفاده از مفهوم دسته‌بندی شبکه، روشی برای به اشتراک گذاشتن اطلاعات گره‌ها پیشنهاد شده و سپس مدل ریاضی مسأله یافتن مسیرهای چندمقصدی بهینه پایدار توسعه داده شده است. الگوریتمی ابتکاری برای یافتن مسیر از هر فرستنده به مجموعه گره‌های گیرنده ارائه شده که در آن فاصله بین هر دو گره متغیری تصادفی تابع الگوی جابه‌جایی گره‌ها می‌باشد.

۱. مقدمه

امروزه با توسعه فناوری‌های ارتباطی، تقاضای صنایع برای استفاده از امکانات ارسال داده و پهنای باند توسعه یافته است و بازار پررونقی برای این فناوری و به ویژه شبکه‌های سیار بدون زیرساخت (MANET) پیش‌بینی می‌شود. این شبکه‌ها از آنجا که نیاز به زیرساخت ندارند، در حوزه‌های مختلفی نظیر خدمات بیمارستانی، بازار خرده‌فروشی، سیستم‌های اطلاعاتی شرکت‌ها، ویدئو کنفرانس‌ها و ... قابل استفاده هستند. یکی از مهم‌ترین مسائل مطرح در این شبکه‌ها مسیریابی به ویژه در حالت ترافیک چندمقصدی است. چرا که در این شبکه‌ها مسیریاب (Router) ثابتی وجود ندارد و کلیه گره‌ها می‌توانند جابه‌جا شوند و به طریق دلخواه به شبکه متصل شوند. لذا گره‌ها به عنوان مسیریاب عمل می‌کنند که مسیر مورد نیاز به گره‌های دیگر شبکه را ابقا می‌کنند. به این دلیل یافتن مسیری که سطح کیفیت خدمات (QoS) مورد انتظار کاربرها را تأمین کند، اهمیت بسیاری دارد.

مهم‌ترین ویژگی‌های شبکه‌های سیار پهنای باند پایین، جابه‌جایی (پویایی توپولوژی) و توان پایین هستند. عوامل متعددی در کیفیت خدمات شبکه مؤثرند که می‌توان به میزان تأخیر، بهره‌وری استفاده از پهنای باند محدود، میزان توان مصرفی واحدهای سیار، تراکم و تداخل داده‌ها (تعداد بسته کنترلی مورد نیاز برای یافتن مسیر) و ... اشاره کرد. لذا یکی از عوامل مهم در طراحی روش‌های مسیریابی در این شبکه‌ها کاهش سربار انتقال و توان مصرفی است.

با توجه به پویایی توپولوژی این شبکه‌ها، مسیر (درخت) بهینه در یک لحظه پس از تغییر جای واحدهای سیار دیگر معتبر نیست. در حالت حدی می‌توان مسأله مسیریابی چند مقصدی را به صورت دنباله‌ای از مسائل مسیریابی ایستا در نظر گرفت. اما این راه حل بسیار دشوار و وقت‌گیر است و در شرایطی که تناوب تغییرات بالا باشد، کاملاً غیر عملی خواهد بود. از سوی دیگر به دلیل متمرکز نبودن اطلاعات مورد نیاز برای مسیریابی امکان حل مسأله مسیریابی به صورت سراسری در شبکه وجود نداشته و روش‌های پیشنهاد شده جهت حل مسأله مسیریابی در این شبکه‌ها عمدتاً از نوع الگوریتم‌های آزمند (Greedy) بوده و در قالب مسأله تصمیم‌گیری به آن توجه نشده و لذا فاقد تضمین نزدیکی به جواب بهینه است.

در این مقاله ابتدا با استفاده از مفهوم دسته‌بندی در شبکه‌ها، الگوریتمی برای به اشتراک گذاشتن اطلاعات بین گره‌های شبکه پیشنهاد شده است. سپس با در اختیار داشتن اطلاعات مسیریابی (پارامترهای تصمیم‌گیری شبکه نظیر موقعیت گره‌ها، توان باقی‌مانده در هر گره و ...) مدل ریاضی مسأله مسیریابی چند مقصدی با هدف یافتن مسیرهای پایدار تهیه شده است. برای مدل کردن این مسأله از مدل گراف احتمالی استفاده شده است که در آن فاصله بین هر دو گره در شبکه متغیری تصادفی است که خود تابع الگوی جابه‌جایی گره‌ها می‌باشد. مدل ریاضی مسأله برای یافتن درخت مسیر بین گره‌های مبدأ و مقصد با در نظر گرفتن حد بالای تأخیر مجاز ارائه شده است.

دربخش ۲ مروری بر انواع اهداف مسیریابی در شبکه‌های سیار بدون زیرساخت و روش‌های موجود برای مسیریابی ارائه شده و لزوم ارائه روشی برای مسیریابی به صورت یک مسأله تصمیم‌گیری در کل شبکه تبیین شده است. در بخش ۳ روش‌های دسته‌بندی شبکه معرفی شده و الگوریتمی برای ایجاد زیرساخت مجازی در شبکه سیار بدون زیرساخت با استفاده از دسته‌بندی ارائه شده است. در بخش ۴ ابتدا مدل ریاضی مسأله مسیریابی چند مقصدی برای شبکه سیار بدون زیرساخت دسته‌بندی شده با هدف کمینه کردن احتمال نیاز به اصلاح مسیر ارائه شده و در پی آن الگوریتمی ابتکاری برای حل مسأله پیشنهاد شده است. بخش ۵ به بررسی کارآیی الگوریتم پیشنهادی اختصاص دارد. شبکه‌های نمونه به طور تصادفی ساخته شده‌اند و عملکرد الگوریتم با استفاده از شبیه‌سازی شبکه مورد بررسی قرار گرفته است. بخش ۶ نیز به جمع‌بندی و پیشنهادات برای پژوهش‌های آتی می‌پردازد.

۲. روش‌های مسیریابی چندمقصدی در شبکه‌های سیار بدون زیرساخت

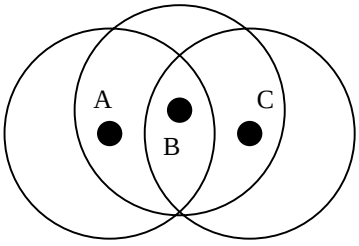
۲,۱. تعریف مسأله

در مسیریابی چند مقصدی هدف اصلی یافتن مسیری بین گره‌ها برای ارسال داده‌ها از یک یا چند فرستنده به چندین گیرنده می‌باشد، به نحوی که مصرف منابع می‌نیمم باشد. از جمله منابعی که می‌توانند کمینه شوند پهنای باند، زمان و هزینه اتصال است. یک گروه چند مقصدی (Multicast Group) مجموعه‌ای از گره‌های شبکه است که نیاز دارند بخشی از اطلاعات خود را با هم به اشتراک بگذارند. یک گروه چند مقصدی می‌تواند یک یا بیشتر گره فرستنده (مبدأ) و بیش از یک گیرنده (مقصد) داشته باشند. البته در شرایطی که بیش از یک گره مبدأ وجود دارد اطلاعات یکسانی بین کلیه گره‌ها به اشتراک گذاشته می‌شود (Oliveira, 2005).

یک گروه چند مقصدی می‌تواند ایستا یا پویا باشد. در گروه ایستا بعد از ایجاد آن تغییری نمی‌توان داد (Wall, 1980). مسأله مسیریابی اطلاعات در گروه‌های ایستا اغلب به عنوان گونه‌ای از مسأله درخت Steiner مدل می‌شود. از سوی دیگر در گروه‌های پویا امکان اضافه یا حذف اعضا یا تغییر موقعیت آنها در هر زمان وجود دارد (Waxman, 1988). بدیهی است نگه‌داری مسیر در گروه‌های پویا کار پیچیده‌ای است چرا که پیشاپیش نمی‌دانیم کدام گره‌ها اضافه یا حذف یا جابه‌جا می‌شوند.

گروه‌های چند مقصدی را می‌توان برحسب تعداد نسبی کاربران آنها نیز دسته‌بندی نمود (Deering, 1990). در گروه‌های کوچک تعداد شرکت‌کنندگان در مقایسه با گره‌های شبکه کم است. برعکس زمانی که بیشتر گره‌های شبکه درگیر مسیریابی چند مقصدی باشند، گروه بزرگ خوانده می‌شود (Waitzman, 1988).

از آنجا که شعاع انتقال هر گره محدود می‌باشد، مسیر از مبدأ به مقصد از تعدادی گره‌های میانی می‌گذرد. در شبکه سیار بدون زیرساخت نشان داده شده در شکل ۱ گره‌های A و B در شعاع انتقال یکدیگر قرار دارند و می‌توانند به طور مستقیم به هم داده ارسال کنند. ولی اگر گره A بخواهد بسته‌ای به C بفرستد باید ابتدا آن را به B بفرستد و سپس B مسیر مورد نیاز به C را فراهم کند.



شکل ۱: مثالی از شبکه سیار بدون زیرساخت

۲,۲. روش‌های مسیریابی چندمقصدی در شبکه‌های سیار بدون زیرساخت

در محیط سیمی، دو الگوی متداول برای مسیریابی وجود دارند: کوتاه‌ترین درخت مسیر چندمقصدی و درخت هسته‌محور (Core-based). در روش کوتاه‌ترین درخت مسیر چندمقصدی این تضمین وجود دارد که کوتاه‌ترین مسیر به هر گیرنده به دست آید. این روش برای شبکه‌های بزرگ کارایی ندارد. چون برای هر عضو گروه باید درخت فراگیر ساخته شود. در درخت هسته‌محور تضمینی برای کوتاهی مسیر وجود ندارد ولی برای هر گروه تنها یک درخت ساخته می‌شود. بنابراین، تعداد درخت‌های مورد نیاز به میزان قابل توجهی کاهش می‌یابد. برخلاف پروتکل‌های مسیریابی سیمی، برای مسیریابی شبکه‌های سیار بدون زیرساخت عوامل مختلفی باید در نظر گرفته شود. به خاطر پویایی توپولوژی شبکه و محدودیت پهنای باند و توان واحدهای سیار در مسیریابی آنها باید از پخش (flooding) سراسری پرهیز شود. همچنین مسیرها و عضویت گروه‌ها باید به صورت پویا ساخته شوند (Ilyas, 2003). روش‌های مسیریابی این شبکه‌ها به دو دسته کلی مبتنی بر جدول (table-driven) و مبتنی بر تقاضا از فرستنده (Source Initiated On-demand) تقسیم می‌شوند (Royer & Koh).

در پروتکل‌های مسیریابی مبتنی بر جدول، هدف حفظ و بروز کردن اطلاعات مسیریابی از هر گره به هر گره دیگر در شبکه است. این پروتکل‌ها برای هر گره نیاز به جدولی دارند تا اطلاعات مسیریابی در آن ذخیره شود و آنها با انتشار پیغام‌های بروزسازی در شبکه به تغییرات توپولوژی شبکه پاسخ می‌گویند تا نمای شبکه سازگار بماند. تفاوت این پروتکل‌ها در تعداد جداول مسیریابی مورد نیاز و روش انتشار تغییرات ساختار شبکه است.

مسیریابی مبتنی بر تقاضا رویکردی متفاوت با مسیریابی جدولی دارد. در این گونه پروتکل‌ها، مسیرها تنها زمانی ایجاد می‌شوند که یک گره مبدأ به آن نیاز داشته باشد. در این روش‌ها فرآیند کشف مسیر در شبکه زمانی آغاز می‌شود که یک گره مبدأ نیازمند مسیری به مقاصد خود باشد. این فرآیند زمانی تمام می‌شود که مسیری به دست آید یا کلیه ترکیبات مسیرها بررسی شده باشند. زمانی که مسیری برقرار شد، با استفاده از برخی رویه‌های نگه‌داری مسیر تا وقتی ابقا می‌شود که مقصد غیر قابل دسترس شود یا مسیر مورد نظر دیگر مورد نیاز نباشد.

از آنجا که در این شبکه‌ها اطلاعات مورد نیاز برای مسیریابی متمرکز نیست و به دلیل پویایی شبکه تغییر می‌کند، به جز بسته‌های داده اصلی، دسته‌ای پیغام‌های کنترلی برای آگاهی از وضعیت گره‌های شبکه مورد نیاز است که ارسال می‌شوند. تنوع و تعداد این نوع پیغام‌ها در روش‌های مختلف متفاوت است و با توجه به محدودیت پهنای باند و توان در دسترس، یکی از عوامل مطلوبیت روش‌های مسیریابی در این شبکه‌ها کم بودن تعداد پیغام کنترلی مورد نیاز است.

روش‌های دیگری نیز وجود دارند که در طراحی آنها از هر دو مفهوم فوق بهره گرفته شده است. در ادامه برخی از روش‌های تلفیقی مسیریابی چندمقصدی در این شبکه‌ها معرفی می‌شوند.

۲,۲,۱. پروتکل مسیریابی چندمقصدی مبتنی بر تقاضا[1] (ODMRP)

این پروتکل (Bae et al., 2000) از مفهوم ارسال گروهی استفاده می‌کند (تنها زیرمجموعه‌ای از گره‌ها بسته‌های داده را ارسال می‌کنند). در این روش هیچ پیغام کنترلی صریحی برای ترک گروه مورد نیاز نیست. عضویت گروه‌ها و مسیرهای منتهی به مقاصد توسط گره فرستنده‌ای که تقاضای ارسال دارد، برقرار و بروز می‌شود. گره مبدأ S به هنگام نیاز به ارسال داده به گروه خود، چنانچه مسیر مورد نیاز را نداشته باشد، بسته JOIN_DATA را به کل شبکه منتشر می‌کند.

پس از فرآیند ساخت مسیر، مبدأ می‌تواند بسته‌های داده را از طریق مسیر انتخاب شده و گروه‌های ارسال‌کننده به گیرندگان خود بفرستد. تا زمانی که داده‌ای برای ارسال وجود دارد، مبدأ به صورت دوره‌ای بسته‌های JOIN_DATA را برای بروز کردن گروه‌ها و مسیرها منتشر می‌کند. هر گرهی که بسته‌های داده را دریافت می‌کند آن را منتقل می‌کند مگر اینکه قبلاً آن را دریافت کرده باشد و/ یا زمان گروه منقضی شده باشد. به این ترتیب سربار ترافیک کمینه می‌شود و از ارسال بسته از مسیرهای منقضی شده پرهیز می‌گردد.

در این روش، مسیری که به دست می‌آید به هیچ وجه تضمین بهینگی یا ارضای معیارهای QoS را ندارد. چرا که اصلاً در فرآیند مسیریابی امکان در نظر گرفتن این عوامل وجود نداشته است.

۲,۲,۲. پروتکل مسیریابی چندمقصدی بردار فاصله مبتنی بر تقاضا[2] (Multicast AODV)

AODV را به عنوان یک سیستم فراگیری مسیر مطلقاً مبتنی بر تقاضا دسته‌بندی می‌کنند که در آن گره‌هایی که روی یک مسیر نیستند، نیاز به نگه‌داری اطلاعات مسیریابی ندارند و در تغییرات جدول شرکت نمی‌کنند (Perkins & Royer, 1999).

[1] - On-Demand Multicast Routing Protocol
[2] - Multicast Ad Hoc On-demand Distance Vector Routing Protocol

زمانی که یک گره مبدأ بخواهد پیغامی را به گره‌های مقصد منتقل کند و مسیر معتبری به آن مقاصد موجود نباشد، فرآیند کشف مسیر آغاز می‌شود. در این زمان بسته درخواست مسیر (RREQ) به همسایگان مبدأ منتشر می‌شود که آنها هم به نوبه خود این درخواست را به همسایگان خود منتقل می‌کنند و به همین ترتیب ادامه می‌یابد تا وقتی که به مقاصد یا به گره واسطی برسیم که منتهی به مسیر «به اندازه کافی جدیدی» به مقصد باشد.

در خلال فرآیند فرستادن RREQ، گره‌های میانی در جداول مسیر خود نشانی همسایه‌ای را که از آن اولین نسخه بسته را دریافت کرده‌اند، ثبت می‌نمایند تا بدین وسیله مسیر برگشت را بسازند. اگر نسخه‌های دیگری از همان RREQ بعداً از راه رسید، نادیده گرفته می‌شوند. هنگامی که RREQ به مقصد یا گره واسطی با مسیر به اندازه کافی جدید می‌رسد، مقصد یا گره میانی مورد نظر با ارسال بسته پاسخ مسیر (RREP) به همسایه‌ای که RREQ را از آن دریافت کرده بود، واکنش می‌دهد. با انتشار RREP در مسیر برگشت، ورودی مسیر رو به جلو را _ که گرهی است که RREP از آن آمده _ در جدول مسیر خود تنظیم می‌کنند. این ورودی‌ها مسیر رو به جلو فعال را نشان می‌دهند. همراه با هر ورودی مسیر یک زمان‌سنج مسیر نیز وجود دارد که چنانچه از ورودی مورد نظر در مدت مشخصی استفاده نشود، آن را حذف می‌کند. از آنجا که RREP روی مسیری پیش می‌رود که توسط RREQ ایجاد شده، AODV تنها استفاده از اتصالات متقارن را پشتیبانی می‌کند.

مسیرها به طریق زیر نگه‌داری می‌شوند. چنانچه گره مبدأ جابه‌جا شود، می‌تواند پروتکل شناسایی مسیر را برای یافتن مسیر جدیدی به مقصد از نو فعال کند. اگر گرهی در طول مسیر جابه‌جا شود، همسایه بالادستی آن متوجه جابه‌جایی می‌شود و یک پیغام هشدار نقصان اتصال (Link Failure Notification) به کلیه همسایگان بالادستی فعال منتشر می‌کند تا اختلال بخشی از مسیر را به آنان اطلاع دهد. این گره‌ها نیز پیغام مورد نظر را به همسایگان بالادستی خود می‌فرستند و به همین ترتیب ادامه می‌یابد تا به گره مبدأ برسد. حال گره مبدأ اگر هنوز به مسیری به مقصد قبلی نیاز داشته باشد، دوباره فرآیند شناسایی مسیر را فعال می‌کند.

این روش نیز مانند روش پیشین نمی‌تواند مسیری به دست آورد که تضمینی برای ارضای سطح خدمات مطلوب داشته باشد.

۳،۲،۲. پروتکل مسیریابی سردسته درگاه[1] CGSR

این روش برای مسیریابی یک‌مقصدی طراحی شده است. ولی منطق آن قابل تعمیم به ترافیک چندمقصدی نیز هست. از آنجا که الگوریتم پیشنهادی ما با استفاده از مفهوم این روش طراحی شده است، در اینجا به معرفی آن می‌پردازیم.

این روش به جای یک شبکه مسطح، یک شبکه سیار سلسله‌مراتبی است. با قرار دادن یک سردسته برای کنترل گروهی از گره‌های شبکه بدون زیرساخت، چارچوبی برای جداسازی کدها (بین دسته‌ها)، دسترسی به کانال مسیریابی و تخصیص پهنای باند حاصل می‌شود. برای انتخاب سردسته‌ها از بین گره‌های شبکه الگوریتم‌های گوناگونی وجود دارد. عیب این روش در این است که تغییر گاه‌به‌گاه سردسته می‌تواند تأثیر قابل توجهی بر عملکرد پروتکل مسیریابی بگذارد، چرا که گره‌ها به جای ارسال بسته‌ها مشغول به انتخاب سردسته می‌باشند. لذا به جای اینکه با هر بار تغییر عضویت در دسته، سردسته جدید انتخاب شود، الگوریتم دسته‌بندی حداقل تغییر دسته معرفی شده است. در این روش سردسته‌ها تنها زمانی عوض می‌شوند که دو سردسته بخواهند با هم ارتباط برقرار کنند یا یک گره از ارتباط با کلیه سردسته‌ها خارج شود.

گره‌های درگاه گره‌هایی هستند که در حوزه ارتباطی دو یا بیشتر سردسته قرار گرفته‌اند. بسته فرستاده شده از یک گره ابتدا به سردسته فرستاده می‌شود و سپس از طریق آن سردسته به یک درگاه یا سردسته دیگر فرستاده می‌شود و به همین ترتیب ادامه می‌یابد تا به سردسته گره مقصد برسد. آنگاه بسته به مقصد ارسال می‌شود. در این روش هر گره باید «جدول عضویت دسته» را که سردسته مقصد را برای هر گره سیار در شبکه ثبت می‌کند، داشته باشد. این جداول عضویت توسط الگوریتم مسیریابی به طور دوره‌ای توسط هر گره منتشر می‌شوند. گره‌ها جداول عضویت دسته خود را برپایه چنین جداولی که از همسایگان دریافت می‌کنند، بروز می‌کنند.

[1] - Cluster-head Gateway Switch Routing

۳. الگوریتم ایجاد زیرساخت مجازی شبکه سیار با استفاده از دسته‌بندی شبکه

۳,۱. مروری بر دسته‌بندی شبکه و کاربرد آن در مسیریابی

برای بهینه‌سازی مسأله مسیریابی چند مقصدی در شبکه‌های سیمی اهداف گوناگونی نظیر تأخیر مسیر، هزینه کل درخت، حداکثر تراکم (Congestion) و غیره را می‌توان در نظر گرفت. اما در شبکه‌های بی‌سیم سیار که زیرساخت ثابتی وجود ندارد، اطلاعات مورد نیاز برای مسیریابی در یک محل متمرکز نیست و لذا مسأله مسیریابی در قالب یک مسأله بهینه‌سازی مطرح نشده است. همان‌طور که در بخش قبل دیدیم، روش‌های مسیریابی این شبکه‌ها از اطلاعات محلی گره‌ها استفاده می‌کنند و به این ترتیب تضمینی وجود ندارد که اهداف بهینه‌سازی و/یا سطح کیفیت خدمات مطلوب به صورت سراسری تأمین شود. برای حل این مشکل لازم است که زیرساختی مجازی برای شبکه ایجاد شود به نحوی که کلیه اطلاعات لازم برای مسیریابی در آن متمرکز باشد.

الگوریتمی که در اینجا برای ایجاد زیرساخت مجازی شبکه پیشنهاد شده از مفهوم دسته‌بندی شبکه، که در روش CGSR از آن استفاده می‌شود، بهره می‌گیرد. به گفته پرکینز (Perkins, 2001) تجمیع اطلاعات مسیریابی عامل اساسی در مقیاس‌پذیری اینترنت است. به طور خاص، نشانی IP یک گره شامل اطلاعات سلسله‌مراتبی مربوط به موقعیت آن است که در مسیریابی مجدد مورد استفاده قرار می‌گیرد. در شبکه‌های سیار بدون زیرساخت به دلیل جابه‌جایی گره‌ها این مسأله به سادگی انجام نمی‌شود (Chen et al., 2004).

با این حال در شبکه‌های سیار بدون زیرساخت با ابعاد بزرگ، ساختارهای حزئی قابل توجهی هستند که نسبتاً پایدارند. به این ترتیب که در عین اینکه کاربران سیار هستند، ولی جابه‌جایی آنها معمولاً در حوزه جغرافیایی مشخصی انجام می‌شود. به عنوان مثال می‌توان دانشجویانی را در نظر گرفت که در طول روز در محوطه دانشکده جابه‌جا می‌شوند و به مناطق شهری مراجعه می‌کنند. این‌گونه جابه‌جایی‌ها موجب تغییر توپولوژی به صورت محلی می‌شود ولی تغییر چندانی در ساختار کلی شبکه ایجاد نمی‌کند. این وضعیت منجر به پیدایش ایده دسته‌بندی شبکه شده است.

در مسیریابی مبتنی بر دسته‌بندی شبکه به جای استفاده از ساختار مسطح، از ساختار سلسله‌مراتبی استفاده می‌شود. مزیت این روش در این است که تداخل در شبکه کاهش می‌یابد و به این ترتیب کنترل دسترسی بهتر صورت می‌گیرد. نقطه ضعف این روش مربوط به محدودیت توان واحدهای سیار است. گره‌های سردسته که به طور پیش‌فرض مراکز ارتباطی شبکه هستند، به میزان قابل توجهی مورد استفاده قرار می‌گیرند و به این دلیل باتری آنها به زودی خالی می‌شود. برای حل این مشکل در (Liu & Lin, 2004) روشی برپایه تغییر سردسته در هر دسته و تقسیم بار کاری سردسته بین گره‌های دسته پیشنهاد شده است.

برای دسته‌بندی شبکه و تعیین سردسته‌ها روش‌های مختلفی وجود دارد. عمده این روش‌ها بر اساس تعیین مجموعه احاطه‌گر همبند می‌نیمم هستند. یادآوری می‌کنیم که زیرمجموعه‌ای از رأس‌های یک گراف، یک مجموعه احاطه‌گر همبند است اگر احاطه‌گر (Dominating) باشد و زیرگراف القایی حاصل از آن نیز همبند باشد (جهانبخت، ۲۰۰۴). از آنجایی که تعیین این مجموعه یک مسأله NP-complete است، روش‌های پیشنهادی برای آن از نوع روش‌های ابتکاری می‌باشند (Alzoubi et al., 2003).

صرف‌نظر از نحوه دسته‌بندی شبکه، نکته‌ای که وجود دارد امکان استفاده از ساختار شبکه دسته‌بندی شده برای به اشتراک‌گذاری اطلاعات مورد نیاز مسیریابی است که تاکنون مورد توجه قرار نگرفته است. در بخش بعد به تشریح الگوریتم پیشنهادی برای اشتراک اطلاعات شبکه می‌پردازیم.

۳,۲. الگوریتم کسب اطلاعات مورد نیاز مسیریابی در شبکه سیار بدون زیرساخت دسته‌بندی شده

۳,۲,۱. فرضیات

۱. تقاضای ارسال بسته داده، متغیری تصادفی با توزیع احتمال مشخص است و هر بار تقاضای ارسال چندمقصدی به طور تصادفی از یکی از واحدهای فرستنده که گیرنده‌های آن هم مشخص است می‌آید. (این الگوریتم با رسیدن تقاضای ارسال بسته از طرف یکی از واحدهای فرستنده فعال می‌شود.)
۲. جابه‌جایی گره‌ها در شبکه تابع الگوی تصادفی معلومی است. به عبارت دیگر، موقعیت جغرافیایی هر گره در حوزه مورد نظر در هر لحظه متغیری تصادفی با توزیع احتمال معلوم است.
۳. شبکه با استفاده از الگوریتم مطرح شده در (Liu & Lin, 2003) دسته‌بندی شده است.
۴. اطلاعات گره‌های موجود در هر دسته (ID و توان باقیمانده هر گره) در سردسته موجود است.
۵. گره‌های هر دسته به طور دوره‌ای پیغام سلام را منتشر می‌کنند. دریافت پیغام سلام توسط سردسته به معنی وجود گره در آن دسته است. سردسته‌ها پس از دریافت پیغام‌های سلام، اطلاعات خود را بروز می‌کنند.
۶. کلیه گره‌های شبکه مشابه بوده (شعاع انتقال همسان) و محدودیت توان دارند.
۷. از لحظه‌ای که بسته داده‌ای از یک گره به گرهی در شعاع انتقال آن ارسال می‌شود تا لحظه دریافت در مقصد، زمانی صرف می‌شود که تأخیر اتصال نامیده می‌شود و متناسب با فاصله بین دو گره در نظر گرفته شده است.
۸. مشارکت گره‌ها در فرآیند ارسال داده توأم با صرف انرژی است که میزان انرژی صرف شده متناسب با فاصله بین گره‌هاست.
۹. گره‌ها تا زمانی می‌توانند در رویه مسیریابی شبکه فعال باشند که توان باقیمانده آنها از یک مقدار بحرانی بالاتر باشد. چنانچه گرهی توانش با پایین‌تر از حد مجاز برسد، دیگر نمی‌تواند در مسیریابی شرکت کند. در دوره عمر شبکه امکان استفاده از منبعی برای تجدید توان گره‌ها در نظر گرفته نشده است.

۳,۲,۲. الگوریتم جمع‌آوری اطلاعات مورد نیاز مسیریابی

بر حسب اینکه مسأله مسیریابی با چه هدف و محدودیت‌هایی تعریف شده باشد، اطلاعات (پارامترهای) گوناگونی مورد نیاز خواهد بود. به همین دلیل در ابتدا مسأله مسیریابی شبکه سیار بدون زیرساخت را که در این مقاله مد نظر می‌باشد، تعریف می‌نماییم و سپس در بخش بعد مدل ریاضی مسأله را ارائه می‌کنیم.

- شبکه سیار بدون زیرساخت با تعداد مشخصی واحد سیار (گره) مفروض است. تعدادی از گره‌ها به عنوان فرستنده عمل می‌کنند که هر یک از آنها با مجموعه‌ای معلوم و ثابت از گره‌های گیرنده (مقصد) داده منتقل می‌کنند (گروه‌های چندمقصدی). هدف مسیریابی، یافتن جنگلی (مجموعه‌ای از درختان) با حداقل هزینه است که فرستندگان را به گیرندگان مربوط به آنها متصل کند. در هر گروه چند مقصدی حداکثر تأخیر نباید از مقدار مشخصی بیشتر شود و با توجه به محدودیت توان گره‌ها حتی‌المقدور باید توان کمتری صرف انتقال داده شود.

مسأله یافتن درخت فراگیر با محدودیت تأخیر، مسأله‌ای NP-complete می‌باشد (Garey & Johnson, 1979) و از سوی دیگر به دلیل ماهیت پویای شبکه، مسیری که یک بار به دست آمده با از مسیر خارج شدن گره‌های موجود در آن به خاطر تغییر توپولوژی شبکه یا افت توان، دیگر معتبر نیست و مسأله مسیریابی باید دوباره حل شود. از این‌رو در این مقاله، تابع هزینه مسأله متناسب با احتمال ناپایداری مسیر در نظر گرفته شده است. یعنی به عبارت دیگر هدف تعیین مسیری است که احتمال نیاز به تغییر (اصلاح) آن در یک حوزه زمانی مشخص کمینه باشد.

به این ترتیب اطلاعات مورد نیاز برای تعریف مسأله بهینه‌سازی مورد نظر توان باقیمانده گره‌ها می‌باشد. الگوریتم پیشنهادی برای کسب این اطلاعات و به اشتراک‌گذاری آنها به شرح زیر است:

۱. ارسال بسته تقاضای انتقال داده از گره فرستنده به سردسته آن (از این پس این سردسته را مجری مسیریابی یا به اختصار مجری می‌نامیم). این ارسال از طریق انتشار (broadcasting) می‌تواند انجام شود.
۲. مجری به محض دریافت تقاضای ارسال به فهرست گره‌های دسته خود مراجعه می‌کند. اگر کلیه گیرندگان مورد نظر در دسته فعلی باشند، فرآیند مسیریابی متوقف می‌شود. مجری با در اختیار داشتن اطلاعات مورد نیاز و با استفاده از الگوریتم مسیر پایدار (بخش ۴) کلیه مسیرهای مورد نیاز به گیرنده‌های موجود در دسته خود را به دست می‌آورد. مجری یک پیغام تأیید به فرستنده می‌فرستد که شامل ID گره‌های گیرنده‌ای است که در دسته فعلی حضور دارند و مسیر مورد نیاز ارسال داده از فرستنده به آنها مشخص شده است.
۳. چنانچه حداقل یکی از گیرندگان مورد نظر فرستنده در دسته فعلی نباشند، مجری یک پیغام تقاضای اطلاعات به کلیه سردسته‌های دیگر می‌فرستد. این پیغام شامل ID گره‌های گیرنده‌ای است که در دسته فعلی موجود نیستند و لذا مسیر بهینه به آنها با اطلاعات فعلی مجری قابل تعیین نیست. ارسال پیغام تقاضای اطلاعات از طریق انتشار صورت می‌گیرد.
۴. سردسته‌ها به محض دریافت بسته تقاضای اطلاعات در فهرست گره‌های دسته خود جستجو می‌کنند. هر سردسته‌ای که گره یا گره‌های گیرنده در دسته مربوط به آن باشند، یک پیغام حاوی اطلاعات مورد نیاز مسیریابی به مجری می فرستد. این پیغام شامل ID و میزان توان موجود در گیرنده مورد نظر می‌باشد. برای ارسال این پیغام نیز می‌توان از انتشار استفاده کرد.
۵. مجری پس از دریافت اطلاعات مورد نیاز کلیه گیرندگان، مسیرهای مورد نیاز را با استفاده از الگوریتم مسیر پایدار (زیر) به دست می‌آورد و یک پیغام تأیید شامل مسیرها (درختان) به گره فرستنده (مبدأ) ارسال می‌کند. این پیغام نیز از مسیری که با استفاده از الگوریتم مسیر پایدار به دست می‌آید، فرستاده می‌شود.

۴. مدل ریاضی مسأله مسیریابی و الگوریتم مسیر پایدار

۴,۱. مدل ریاضی مسأله مسیریابی پایدار چندمقصدی با محدودیت تأخیر

پس از جمع‌آوری اطلاعات مورد نیاز برای مسأله مسیریابی، سردسته مجری به منزله یک زیرساخت مجازی بوده که می‌تواند کلیه مسیرهای مورد نیاز به گیرنده‌ها را به دست آورد. از آنجا که در شبکه‌های بی‌سیم سیار اتصالات سیمی وجود ندارد، تابع هزینه به طور مستقیم بر حسب فاصله گره‌ها تعریف نمی‌شود. همان‌طور که قبلاً گفته شد، به دلیل پویایی این شبکه‌ها مسیر بهینه به دست آمده پایدار نیست و در معرض تغییر قرار دارد. اصلاح مسیر به منظور تطبیق با تغییرات شبکه به منزله اجرای دوباره الگوریتم مسیریابی و ارسال تعدادی پیغام‌های کنترلی است. اجرای دوباره الگوریتم زمان می‌برد و ارسال پیغام مستلزم صرف توان و پهنای باند است. از این‌رو در مدلی که ارائه شده تابع برابر احتمال نیاز به اصلاح مسیر در نظر گرفته شده است که کمینه کردن آن به معنی یافتن مسیرهایی است که حتی‌المقدور پایدار باشند.

ناپایداری مسیر ناشی از دو موضوع می‌تواند باشد که یکی منقضی شدن اتصالات (جابه‌جایی گره‌هایی که در مسیر هستند) و در نتیجه خارج شدن از شعاع انتقال یکدیگر و دیگری تمام شدن باتری است. صرف توان در گره‌ها به خاطر شرکت در مسیریابی است که می‌توان توان صرف شده در ارسال داده از یک گره به گره دیگر را متناسب با فاصله گره‌ها (که خود متغیری تصادفی است) در نظر گرفت. به این ترتیب تابع هدف مسأله به صورت دوگانه کمینه کردن احتمال افزایش طول اتصالات انتخاب شده از شعاع انتقال در مدت زمان مورد نیاز برای پایداری مسیر و کمینه کردن امید ریاضی توان مصرفی در ارسال داده‌ها از مسیر است. مسأله مسیریابی چندمقصدی با محدودیت تأخیر، با در نظر گرفتن متغیرهای زیر به صورت زیر فرموله شده است:

$$x_{ij} = \begin{cases} 1 & \text{اگر اتصال بین i و j در درخت فراگیر } T \text{ باشد} \\ 0 & \text{در غیر این صورت} \end{cases}$$

$$Min \quad Link_Unstability_\Pr obability = \prod_{(i,j)\in E}(1 - F(D \times x_{ij}, t_0 + T)) \qquad (۱)$$

$$Min \quad Power_Unstability = \sum_{(i,j)\in E} E(x_{ij} \times d_{ij} \times Power) \qquad (۲)$$

Subject to

$$\sum_{(i,j)\in E} x_{ij} = |V| - 1, \qquad (۳)$$

$$\sum_{(i,j)\in G(H)} x_{ij} = |H| - 1 \quad for \quad all \quad H \subset V, \qquad (۴)$$

$$x_{ij} = 0 \quad for \quad i, \ Power(i) < Min_Power, \qquad (۵)$$

$$P(Delay_{S_d} > \Delta) \le \alpha \quad for \quad all \quad d \in S_Destination_Set, \qquad (۶)$$

$$Delay_{S_d} = \sum_{(i,j)\in P_T(s,d)} d_{ij} \times x_{ij} \times lag, \qquad (۷)$$

$$x_{ij} \in \{0,1\}^{|E|}$$

$F(d_{ij}, t)$: تابع تجمعی احتمال طول اتصال (i,j) در زمان t

D : شعاع انتقال هر گره

t_0: زمان شروع ارسال داده از مسیر

T: حداقل زمان مورد نیاز برای پایداری مسیر

Power: میزان توان مصرفی برای ارسال داده از یک گره به گرهی در فاصله یک واحد

E: مجموعه اتصال‌های بین گره‌های شبکه

G(H): زیرگراف منتج شده از گره‌های H

Power(i): توان باقیمانده در گره i

Min_Power: حداقل توان مورد نیاز برای ارسال داده

Δ: حداکثر تأخیر مجاز مسیر فرستنده به گیرنده

α: احتمال پذیرش مسیر با تأخیر بیش از حد مجاز

S_destination_set: مجموعه گره‌های دریافت‌کننده اطلاعات از گره S

lag: ثابت تناسب تأخیر اتصال با طول آن

یکی از توابع هدف مسأله ، کمینه کردن احتمال ناپایداری اتصالات انتخاب شده در مدت مورد نیاز عمر مسیر است. احتمال ناپایداری اتصال (i,j) در زمان تصمیم‌گیری (t_0) تا مدت مورد نیاز عمر مسیر (T) به صورت احتمال اینکه طول اتصال مورد نظر (فاصله بین گره‌های i و j) در زمان $t_0 + T$، از شعاع انتقال واحدهای سیار بیشتر شود، تعریف شده است. با توجه به اینکه فرض شده الگوی جابه‌جایی گره‌ها در فضای دوبعدی معلوم باشد، فاصله بین دو گره i و j در هر زمان خود متغیری تصادفی تابع حرکت گره‌هاست. اگر جابه‌جایی افقی گره‌های i و j را با

x_i و x_j و جابه‌حایی عمودی آنها را با y_i و y_j و فاصله بین آنها را در زمان t_0+T با d_{ij,t_0+T} نشان دهیم، احتمال ناپایداری به صورت زیر تعریف می‌شود:

$$(x_i, y_i, t) \sim f_{X,Y,t}(x, y, t)$$

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

$$\begin{aligned} P(d_{ij,t_0+T} > D) &= 1 - P(d_{ij,t_0+T} < D) \\ &= 1 - \int_0^D f(d_{ij}, t_0+T) d(d_{ij}) \\ &= 1 - F(D \times x_{ij}, t_0+T) \end{aligned} \quad (۸)$$

با فرض مستقل بودن انتخاب اتصال‌ها می‌توان احتمال اینکه کلیه اتصالات در مدت مورد نیاز پایدار باقی بمانند را به صورت حاصل‌ضرب احتمالات جزئی این اتصالات نوشت. البته فرض استقلال اتصال‌ها (x_{ij} ها) خالی از اشکال نیست. ولی به خاطر لزوم پرهیز از پیچیدگی بیشتر مدل این فرض در نظر گرفته شده که عملاً با در نظر گرفتن محدودیت‌های مربوط به تشکیل درخت فراگیر در مسأله به میزان مطلوبی اصلاح می‌شود و از سوی دیگر به دلیل اینکه اتصالات همزمان انتخاب می‌شوند، می‌توان این فرض را موجه دانست.

محدودیت‌های (۲) و (۳) محدودیت تشکیل درخت فراگیر هستند. محدودیت (۴) تضمین می‌کند که گره‌هایی که توان آنها از حد مجاز پایین‌تر است در مسیریابی شرکت نکنند. محدودیت (۵) تضمین می‌کند که احتمال افزایش تأخیر مسیر از فرستنده به هر یک از گیرندگان از میزان تأخیر مجاز کمتر از α باشد. تأخیر ناشی از هر اتصال متناسب با طول آن در نظر گرفته شده که همان‌طور که گفته شد (معادله (۷))، متغیری تصادفی با تابع احتمال معلوم است که معادله آن در رابطه (۶) داده شده است.

با توجه به اینکه ثابت شده مسأله درخت Steiner با محدودیت تأخیر NP-complete است و این مسأله صورتی پیچیده‌تر از مسأله درخت Steiner دارد (روابط غیر خطی در تابع هدف و محدودیت‌ها)، بدون تردید در حوزه مسائل NP-complete قرار می‌گیرد و به همین دلیل برای حل آن می‌توان به سراغ روش‌های ابتکاری رفت. در بخش بعد الگوریتمی برای حل این مسأله پیشنهاد شده است.

۴،۲. الگوریتم ابتکاری تعیین مسیر چندمقصدی پایدار

۴،۲،۱. مقدمه

در این بخش یک الگوریتم ابتکاری برای مسأله مسیریابی چندمقصدی در شبکه‌های سیار بدون زیرساخت که در بخش قبل تعریف شد، ارائه می‌گردد. در فرموله کردن مسأله مسیریابی، مدل ریاضی را به نحوی طراحی نموده‌ایم که درختانی که به دست می‌آیند، حتی‌المقدور پایدار باشند (با کمینه کردن احتمال نیاز به تغییر مسیر)، اما بدیهی است که مسأله اصلاح مسیر (پس از تغییر توپولوژی شبکه) به قوت خود باقی است و به محض اینکه یک مسیر مورد نیاز دیگر قابل استفاده نباشد، باید مسیر مناسب دوباره تعیین شود. در پروتکل‌های مسیریابی شبکه‌های سیار بدون زیرساخت روش‌های متعددی برای آگاه شدن گره‌ها از تغییر توپولوژی و لذا عدم اعتبار درخت (درختان) به دست آمده قبلی وجود دارد.

Sriram و دیگران (Sriram et al., 1999) الگوریتمی برای مسیریابی چند مقصدی حداقل هزینه با تأخیر محدود که امکان تغییر در گروه‌های چند مقصدی آن وجود داشته باشد، معرفی کرده‌اند که در آن سعی می‌شود با تعیین حداقل تأخیر، کیفیت سرویس ثابت نگه داشته شود. در این الگوریتم امکان سازگار شدن درخت مسیریابی با تغییرات ناشی از اضافه یا کم شدن کاربران وجود دارد. یکی از مزایای این روش، تعیین زمانی است که درخت باید بازسازی شود و نیز تغییراتی که الگوریتم روی درخت اصلی ایجاد می‌کند تا چه زمانی معتبر می‌باشد. برای پاسخ به

این سؤال آنان مفهوم عامل کیفیت را معرفی کردند که میزان مناسب بودن بخشی از درخت مسیریابی را برای بقیه کاربران اندازه‌گیری می‌کند. هنگامی که مقدار عامل کیفیت بخشی از درخت از یک حد آستانه کمتر می‌شود، آن بخش درخت باید اصلاح شود.
در این مرحله صرف‌نظر از اینکه مسیریابی اولیه یا اصلاح مسیری باشد که قبلاً تعیین شده، به شرح الگوریتمی ابتکاری برای حل مسأله‌ای که مدل ریاضی آن در بخش قبل ارائه شد، می‌پردازیم. مسأله اصلاح مسیر حالت خاصی از مسأله کشف مسیر است به این ترتیب که می‌دانیم اتصال بین دو گره i و j مختل شده است (یعنی x_{ij} که قبلاً برابر ۱ بوده به دلیل جابه‌جا شدن گره‌ها یا تمام شدن توان آنها دیگر معتبر نیست). چنانچه اختلال مسیر به دلیل افزایش فاصله بین آنها و خارج شدن از شعاع انتقال یکدیگر باشد، مسأله اصلاح مسیر به مسأله کشف مسیر از گره i به گره j تبدیل می‌شود با این فرض که تغییرات توپولوژی و توان کلیه گره‌ها را در زمان تصمیم‌گیری بدانیم.

۴،۲،۲. الگوریتم ابتکاری مسیریابی پایدار

مسأله مسیریابی پایدار که مدل ریاضی آن در بخش قبل ارائه شد، صورت کامل‌تری از مسأله درخت Steiner با محدودیت تأخیر است. در مسأله درخت Steiner در گراف $G(V,E)$ و مجموعه $R \subseteq V$ از گره‌های مورد نیاز، هدف یافتن درخت با کمترین هزینه است که کلیه گره‌های R را به هم متصل کند. گره‌های موجود در V/R نیز در صورت نیاز می‌توانند مورد استفاده قرار بگیرند و نقاط «Steiner» خوانده می‌شوند. این یک مسأله کلاسیک NP-hard است و مفصلاً در ادبیات مربوط به خود مورد بحث قرار گرفته است. اضافه شدن تابع هدف کمینه کردن احتمال ناپایداری اتصالات (معادله (۱)) این مسأله را پیچیده‌تر می‌کند. برای حل مسأله درخت Steiner با محدودیت تأخیر روش‌های ابتکاری متعددی پیشنهاد شده است. الگوریتمی که در اینجا ارائه شده از روش معرفی شده در (Feng & Yum, 1999) الهام گرفته شده است. در این روش از این ایده استفاده می‌شود که یک درخت با کمترین هزینه و یک درخت با کمترین تأخیر ساخته شود و این درخت‌ها در هم ادغام شوند. درخت با کمترین تأخیر را می‌توان با فرض تأخیر به عنوان تابع هزینه، با استفاده از برخی الگوریتم‌های کوتاه‌ترین مسیر در زمان چندجمله‌ای به‌دست آورد. بنابراین بخش دشوار این الگوریتم، یافتن درخت با کمترین هزینه و سپس تصمیم در مورد نحوه ادغام آن در درخت با کمترین تأخیر است. الگوریتمی که برای تعیین درخت با کمترین هزینه با تأخیر محدود استفاده شده، بهبودیافته الگوریتم دایکسترا است که هر مسیر را در محدوده تأخیر مشخصی نگه می‌دارد. در این الگوریتم برای ترکیب درخت‌های مختلف از زیر روال حذف حلقه استفاده می‌شود که در آن بررسی می‌شود که آیا مسیرهای حاصله کماکان محدودیت تأخیر را ارضا می‌کنند. به این ترتیب پیچیدگی این الگوریتم مشابه الگوریتم دایکسترا است و به لحاظ زمان محاسبات وضعیت بهتری دارد.
با توجه به وجود روابط غیرخطی در تابع هدف و محدودیت‌های مسأله مورد نظر، حل تحلیلی آن بسیار دشوار بوده و لذا در اینجا الگوریتمی ابتکاری برای تعیین جواب‌های آن پیشنهاد شده است. لازم به ذکر است که لزوماً این مسأله فضای جواب موجه ندارد. بسته به اینکه حد بالای تأخیر مسیر قابل قبول چقدر باشد، ممکن است مسأله جواب موجه نداشته باشد. در این حالت الگوریتم ارائه شده در اینجا مسیرهای با کمترین میزان ممکن تأخیر را به دست می‌آورد:

ورودی: گراف G=(V,E)، $i \in V$ $f_{X_i,Y_i,t}(x_i, y_i, t)$ تابع احتمال موقعیت جغرافیایی کلیه گره‌ها در هر زمان ، $s \in V$ گره فرستنده ، $Z \subseteq V \setminus s$ مجموعه گره‌های گیرنده ، D شعاع انتقال گره‌ها ، t_0 زمان شروع ارسال داده از مسیر، T حداقل زمان مورد نیاز برای پایداری مسیر، Power میزان توان مصرفی برای ارسال داده از یک گره به گرهی در فاصله یک واحد، Power(i) توان باقیمانده در گره i، Min_Power حداقل توان مورد نیاز برای ارسال داده، Δ حداکثر تأخیر مجاز مسیر فرستنده به گیرنده، α احتمال پذیرش مسیر با تأخیر بیش از حد مجاز، lag ثابت تناسب تأخیر اتصال با طول آن
خروجی: درخت پایدار $T = (V_T, E_T)$ با تأخیر محدود که از s ریشه گرفته و شامل کلیه گره‌های Z می‌شود.

۱. گره‌هایی را که توان آنها از حد بحرانی کمتر است از شبکه حذف کنید.
۲. احتمال ناپایداری ($P(d_{ij,t_0+T} > D)$) کلیه اتصالات ممکن بین گره‌های شبکه را محاسبه کنید و اتصالات را به ترتیب صعودی احتمال ناپایداری مرتب کنید.
۳. با استفاده از تابع DCSP (کوناه ترین مسیر با تأخیر محدود، (Feng & Yum, 1999)) و با در نظر گرفتن احتمال ناپایداری اتصالات به عنوان هزینه آنها و تأخیر هر اتصال برابر حاصل‌ضرب lag در امید ریاضی طول آن، درخت $T_1 = (V_1, E_1)$ را که از s ریشه گرفته و حداکثر ممکن گره‌های مقصد Z را شامل می‌شود، به دست آورید.
۴. با استفاده از تابع DCSP و با در نظر گرفتن مجموع توان مصرفی گره‌های دو سر هر اتصال به عنوان هزینه آن و تأخیر هر اتصال برابر حاصل‌ضرب lag در امید ریاضی طول آن، درخت $T_2 = (V_2, E_2)$ را که از s ریشه گرفته و حداکثر ممکن گره‌های مقصد Z را شامل می‌شود، به دست آورید.
۵. با استفاده از الگوریتم کوتاه‌ترین مسیر دایکسترا و با در نظر گرفتن امید ریاضی تأخیر هر اتصال به عنوان هزینه آن درخت $T_3 = (V_3, E_3)$ را که از s ریشه گرفته و کلیه گره‌های مقصد Z را فرامی‌گیرد، به دست آورید.
۶. درخت‌های T_1 و T_2 و T_3 را برای به دست آوردن درخت مسیر چندمقصدی ترکیب کنید.
۷. حلقه‌ها را از درخت ترکیبی T حذف کنید.

۴,۳. پروتکل پیشنهادی مسیریابی پایدار شبکه سیار بدون زیرساخت با محدودیت تأخیر

در این بخش کل پروتکل مسیریابی پیشنهادی که مبتنی بر یافتن مسیرهای پایدار است، ارائه شده است:

- دسته‌بندی شبکه (تعیین سردسته‌ها و گره‌های مربوط به هر دسته)
- ارسال پیغام از سردسته‌ها به گره‌های دسته مربوط برای آگاهی از وضعیت عضویت دسته
- ارسال بسته‌های شامل اطلاعات میزان توان از گره‌های هر دسته به سردسته آن، بروز کردن جداول اطلاعات سردسته‌ها
- انتشار دوره‌ای پیغام سلام از کلیه گره‌ها
- سردسته‌ها بر اساس پیغام‌های سلام دریافتی اقدام به بروز کردن عضویت گره‌ها به دسته خود می‌کنند. چنانچه سردسته‌ای پیغام سلام از گرهی که در فهرست اعضای خود دارد، دریافت نکند به منزله این است که گره مورد نظر از دسته خارج شده که این خروج ممکن است به خاطر جابه‌جایی و وارد شدن به حوزه دسته‌ای دیگر یا ناشی از اتمام باتری واحد مورد نظر باشد. به عکس اگر سردسته‌ای از گرهی پیغام سلام دریافت کند که در فهرست اعضای آن نباشد، به معنی عضو جدید برای دسته است که از دسته‌ای دیگر یا به تازگی بدون اینکه سابقه‌ای در شبکه داشته باشد، آمده لست. لازم به ذکر است که جابه‌جایی یا اتمام باتری در مورد خود سردسته‌ها نیز می‌تواند اتفاق بیفتد که در این شرایط سردسته جدید تعیین می‌شود.
- دریافت پیغام تقاضای ارسال داده توسط سردسته از یک گره (به صورت تصادفی)
- جمع‌آوری اطلاعات مورد نیاز مسیریابی با استفاده از الگوریتم ارائه شده در بخش ۳,۲,۲.
- یافتن مسیرهای مورد نیاز با استفاده از الگوریتم ارائه شده در بخش ۴,۲,۲.
- ارسال مسیر به دست آمده به گره متقاضی و سردسته‌هایی که گره یا گره‌هایی از دسته آنها در مسیریابی شرکت می‌کنند.
- بروز کردن وضعیت میزان توان باقیمانده گره‌های شرکت‌کننده در مسیر توسط سردسته‌ها

۵. نتایج شبیه‌سازی

برای بررسی کارآیی الگوریتم پیشنهادی بخش قبل از شبیه‌سازی استفاده شده است. تعدادی شبکه با ابعاد (تعداد گره) متفاوت در منطقه‌ای با مساحت مشخص تولید شده‌اند. درصد گره‌های فرستنده از کل گره‌های شبکه ۵، ۱۰ . ۱۵ درصد در نظر گرفته شده است. ابتدا با استفاده از الگوریتم معرفی شده در [8]، شبکه دسته‌بندی شده و سردسته‌ها مشخص می‌شوند. از آنجا که هدف از این شبیه‌سازی، بررسی عملکرد الگوریتم مسیریابی چند مقصدی پیشنهادی می‌باشد، برای پرهیز از پیچیدگی فرض شده دسته‌ها (به لحاظ موقعیت جغرافیایی) ثابت باشند. به این ترتیب کافی است تنها یک بار الگوریتم دسته‌بندی روی شبکه مورد نظر پیاده‌سازی شود تا دسته‌ها و سردسته‌ها مشخص شوند. پس از آن چنانچه گرهی جابه‌جا شود و از حوزه سردسته خود خارج شود با استفاده از اطلاعات رد و بدل شونده، عضویت گره‌ها به دسته‌ها بروز می‌شود. همین‌طور ممکن است گره‌ها به دلیل از دست دادن توان (باتری) عملاً از شبکه خارج شوند. چنانچه یک گره سردسته از شبکه خارج شود، نزدیک‌ترین گره دسته مربوط به جای آن انتخاب می‌شود. به این ترتیب تعدادی از گره‌های شبکه به عنوان فرستنده هستند و تعدادی به عنوان گیرنده که هر گره فرستنده تعدادی گیرنده مشخص دارد و در هر بار ارسال به همان مقاصد بسته اطلاعاتی می‌فرستد.

تقاضای ارسال بسته به طور تصادفی از فرستنده‌ها می‌رسد. به محض دریافت تقاضای ارسال توسط سردسته، الگوریتم جمع‌آوری اطلاعات شروع به کار می‌کند.

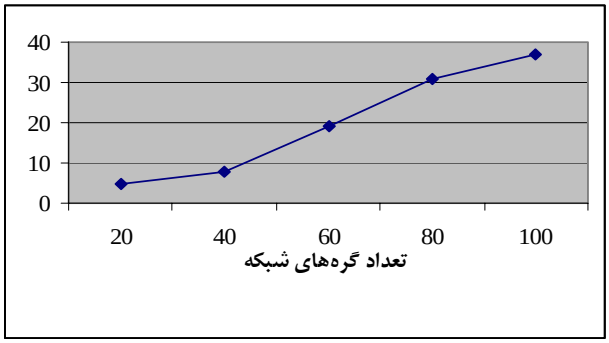
با توجه به فرض ثابت بودن موقعیت جغرافیایی دسته‌ها می‌توان در نظر گرفت قالب اصلی مسیر مورد نیاز بین دسته‌ها ثابت و معلوم است. یعنی به عنوان مثال، مسیر بین دسته A تا دسته B همواره از دسته‌های C و D می‌گذرد. پس از ارسال بسته تقاضای اطلاعات و دریافت جواب از دسته‌ها ، سردسته فرستنده اطلاعات مورد نیاز برای مسیریابی را در اختیار دارد و الگوریتم مسیریابی شروع به کار می‌کند.

لازم به ذکر است که اطلاعات مربوط به جابه‌جایی گره‌ها (که متغیر تصادفی با توزیع احتمال ؟ است) به طور دوره‌ای به سردسته‌ها منتقل می‌شود و عدم دریافت موقعیت یک گره توسط سردسته آن به معنی جابه‌جایی گره و رفتن به یک دسته دیگر است (یعنی سردسته دیگری وضعیت آن گره را دریافت کرده است و گره مورد نظر به عضویت آن دسته در آمده است). به محض دریافت این اطلاعات، جداول اطلاعات سردسته‌ها بروز می‌شود.

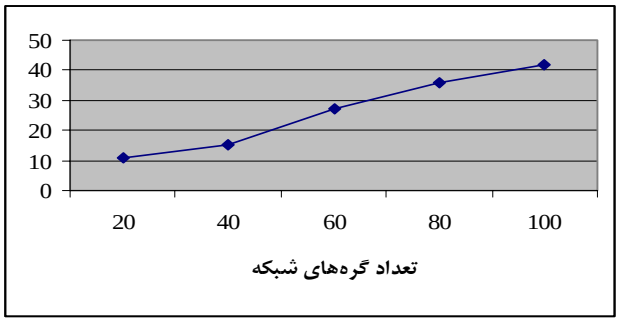
گره‌هایی که در مسیریابی شرکت می‌کنند، متناسب با فاصله بین دو گره توان از دست می‌دهند. همچنین با توجه به فرض فعال بودن دائمی گروه‌ها (نبود مود Sleep) در مدت شبیه‌سازی، گذر زمان نیز سبب کاهش توان واحدهای سیار می‌شود.

به این ترتیب پیشامدهای سیستم عبارتند از: تقاضای ارسال داده (فرستنده)، دریافت تقاضای ارسال (سردسته)، ارسال تقاضای اطلاعات (سردسته)، دریافت تقاضای اطلاعات از یک سردسته (سردسته)، دریافت اطلاعات درخواست شده (سردسته)، دریافت پیغام سلام گره‌های دسته (سردسته)، رسیدن توان سردسته به حد بحرانی.

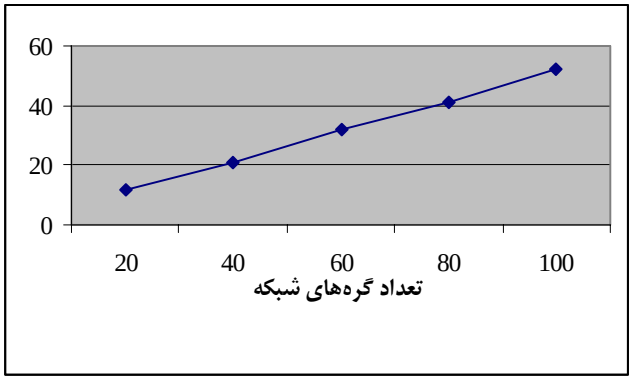
شکل‌های ۲ تا ۴ نتایج شبیه‌سازی را به ازای شبکه‌های با ابعاد مختلف نشان می‌دهند. در این نمودارها عملکرد الگوریتم مسیر پایدار با توجه به دفعات نیاز به اصلاح مسیر نشان داده شده است. کم بودن این دفعات نشان می‌دهد که الگوریتم در یافتن مسیرهای پایدار موفق بوده و به این ترتیب در زمان و پهنای باند مصرف شده جهت مسیریابی مجدد (اصلاح مسیر) صرفه‌جویی شده است. همچنین می‌توان ادعا کرد تعداد دفعات نیاز به اصلاح مسیر تقریباً به طور خطی با تعداد گره‌های شبکه و نیز نسبت گره‌های فرستنده به کل گره‌های شبکه متناسب است.



شکل ۲: تعداد دفعات نیاز به اصلاح مسیر در مدت شبیه‌سازی شبکه (گره‌های فرستنده ۵٪ کل گره‌های شبکه)



شکل ۳: تعداد دفعات نیاز به اصلاح مسیر در مدت شبیه‌سازی شبکه (گره‌های فرستنده ۱۰٪ کل گره‌های شبکه)



شکل ۴: تعداد دفعات نیاز به اصلاح مسیر در مدت شبیه‌سازی شبکه (گره‌های فرستنده ۱۵٪ کل گره‌های شبکه)

۶. جمع‌بندی و پژوهش آتی

در این مقاله با استفاده از مفهوم دسته‌بندی شبکه الگوریتمی برای اشتراک اطلاعات بین گره‌ها و ایجاد زیرساختی مجازی برای مسیریابی مسأله مسیریابی شبکه سیار بدون زیرساخت ارائه شد. با استفاده از اطلاعات متمرکز در زیرساخت مجازی (سردسته‌ها) مسأله در قالب یک مسأله تصمیم‌گیری مدل شد. با توجه به پویایی توپولوژی این شبکه‌ها کافی است جای یک گره عوض شود تا درخت بهینه موجود دیگر قابل استفاده نباشد. از این رو در مدل‌سازی فاصله گره‌ها به صورت متغیری تصادفی که تابع الگوی جابه‌جایی گره‌هاست (که خود متغیری تصادفی می‌باشد) در نظر گرفته شد. همچنین تابع هدف مسأله مسیریابی به گونه‌ای تعریف شد که احتمال نیاز به اصلاح مسیر کمینه شود. به عبارت دیگر، مسیری با حداکثر میزان پایداری تعیین شود. با این حال برای حالتی که مسیر قابل استفاده نباشد (و این وضعیت به اطلاع سردسته مجری مسیریابی برسد) نیز اصلاح مسیر مورد نیاز است که حالت خاصی از مسأله اولیه (کشف مسیر) است. با توجه به NP-complete بودن مسأله، الگوریتمی ابتکاری برای حل آن پیشنهاد شد. کارآیی این الگوریتم با استفاده از شبیه‌سازی چند شبکه تصادفی با ابعاد متوسط نشان داده شد. برای پژوهش آتی، قصد داریم تا الگوریتمی برای دسته‌بندی شبکه با توجه به الگوی جابه‌جایی گره‌ها و توان آنها ارائه دهیم، به نحوی که سردسته‌های انتخاب شده نیز حداکثر میزان پایداری را داشته باشند. تلفیق روش دسته‌بندی جدید با الگوریتم مسیریابی ارائه شده در این مقاله، در

ادامه انجام خواهد شد و شبیه‌سازی برای حالتی که موقعیت جغرافیایی دسته‌ها نیز متغیر باشد، تعمیم داده می‌شود. همچنین بررسی تأثیر دیگر الگوهای جابه‌جایی گره‌ها در کارآیی الگوریتم مسیریابی از جمله پژوهش‌های پیشنهادی آینده است.

مراجع

[1] Alzoubi K., Wan P. and Frieder O., 'Weakly-connected dominating sets and sparse spanners in wireless ad hoc networks', in The 23rd International Conference on Distributed Computing Systems (IEEE, ICDCS), 2003.
[2] Bae S.H., Lee S.J. and Gerla M., The Design, Implementation, and Performance Evaluation of the On-demand Multicast Routing Protocol in Multihop Wireless Networks, IEEE Networks, 2000, 70-77.
[3] Chen Y.P., Liestman A.L. and Liu J., 'Clustering algorithms for ad hoc wireless networks', in Ad Hoc and Sensor Networks, ed. Y. Pan and Y. Xiao. Nova Science Publishers 2004.
[4] Deering S. and Cheriton D., 'Multicast routing in datagram inter-networks and extended lans', ACM Transactions on Computer Systems, 8:2, 1990, 85–111.
[5] Feng G. and Yum TP., 'Efficient multicast routing with delay constraints', International Journal of Communication Systems, 12, 1999, 181–95.
[6] Garey MR. and Johnson DS. 'Computers and intractability: a guide to the theory of NP-completeness', New York, 1979, Freeman.
[7] Ilyas M., The Handbook of Ad hoc Wireless Networks, United States of America, CRC Press, 2003.
[8] Liu J.-S., Lin C.-H.R., 'Energy-efficiency clustering in wireless sensor networks', Ad Hoc Networks, 3: 3, 2005, 371-388.
[9] Oliveira C. and Pardalos P., 'A survey of combinatorial optimization problems in multicast routing', Computers & Operations Research, 32: 8, 2005, 1953-1981.
[10] Perkins C., ed., Ad Hoc Networking, Addison-Wesley, 2001.
[11] Perkins C.E. and E.M.Royer, 'Ad-hoc On-Demand Distance Vector Routing', Proceedings of 2nd IEEE Workshop on Mobile Computing Systems and Applications, 1999.
[12] Royer E.M., Koh C.K., 'A Review of Current Routing Protocols for Ad-Hoc Mobile Wireless Networks', IEEE Personal Communications, 1999, 46-55.
[13]Sriram R., Manimaran G. and Siva Ram Murthy C. 'A rearrangeable algorithm for the construction of delay-constrained dynamic multicast trees', IEEE/ACM Transactions on Networking, 7:4, 1999, 514 –29.
[14] Waitzman D., Partridge C. and Deering S. 'Distance vector multicast routing protocol, RFC 1075—IETF network working group', Available from URL:http://www.ietf.org/, 1988.
[15] Wall D. 'Mechanisms for broadcast and selective broadcast', Ph.D. thesis, Stanford University, 1980.
[16] Waxman B. 'Routing of multipoint connections', IEEE Journal on Selected Areas in Communications, 6:9, 1988, 1617–22.
[۱۷] جهانبخت ن. «کاربرد مفاهیم گراف در شبکه‌ها»، پایان‌نامه کارشناسی ارشد، دانشکده علوم ریاضی، دانشگاه صنعتی شریف، ۱۳۸۳.