

# مسیریابی چندپخشی شبکه‌های سیار بدون زیرساخت با استفاده از دسته‌بندی

محمد مهدی سپهری<sup>i</sup>؛ متین باقرپور<sup>ii</sup>

## چکیده

شبکه سیار بدون زیرساخت شبکه بی‌سیم است که می‌تواند بدون اتکا به هیچ گونه زیرساختار مرکزی واحدهای سیار را پشتیبانی کند. یکی از مهم‌ترین مسائل در شبکه‌های سیار بدون زیرساخت، مسیریابی در حالتی است که یک فرستنده به چندین گیرنده داده ارسال می‌کند. در این شبکه‌ها مسیریاب ثابتی وجود ندارد و همچنین گره‌ها می‌توانند جای‌جا شوند. به این ترتیب مسیری که یک بار با توجه به موقعیت گره‌ها تعیین شده، پس از تغییر موقعیت آنها لزوماً معتبر نیست. به دلیل نبود زیرساخت مرکزی، اطلاعات لازم برای مسیریابی در یک محل متمرکز نیست و از این رو یافتن مسیری که بتواند برخی محدودیت‌های سراسری نظیر تأخیر را ارضا کند، دشوار می‌گردد. در این مقاله ابتدا با استفاده از مفهوم دسته‌بندی شبکه، روشی برای متمرکز کردن اطلاعات مورد نیاز مسیریابی و ایجاد زیرساخت مجازی پیشنهاد شده و سپس مدل ریاضی مسأله یافتن مسیرهای چندپخشی حداکثر پایدار با محدودیت تأخیر ارائه شده است. سپس الگوریتمی ابتکاری برای یافتن درخت مسیر از هر فرستنده به مجموعه گره‌های گیرنده ارائه شده است. کارآیی الگوریتم پیشنهادی توسط نتایج شبیه‌سازی نشان داده شده است.

## کلمات کلیدی

شبکه سیار بدون زیرساخت - مسیریابی چندپخشی - دسته‌بندی - مسیر پایدار

## *Multicast Routing in Mobile Ad hoc Networks with Clustering*

M. M. Sepehri; M. Bagherpour

### ABSTRACT

A mobile ad hoc network is a wireless network, which supports mobile nodes without any fixed infrastructure. Multicast routing is one of the main challenges in mobile ad hoc networks. There is no fixed router in MANETs, so nodes act as routers and determine required routes. However, the route once found is not necessarily valid after movement of nodes. Since there is no centralized information, finding stable routes satisfying global constraints is challenging. In this paper, a method is proposed for sharing nodes information to form a virtual infrastructure. A mathematical formulation of maximum stable multicast tree construction problem with delay constraint is developed and a heuristic algorithm is proposed to solve it. By simulation, we evaluate the performance of proposed algorithm.

### KEYWORDS

Mobile ad hoc network; multicast routing; clustering; stable route.

<sup>i</sup> دانشیار مهندسی صنایع: دانشگاه تربیت مدرس: mehdi.sepehri@modares.ac.ir

<sup>ii</sup> دانشجوی دکترای مهندسی صنایع: دانشگاه تربیت مدرس: mbagher@modares.ac.ir

مسیریابی اطلاعات در گروه‌های ایستا اغلب به عنوان گروه‌ای از مسأله درخت اشتاینر مدل می‌شود. در مسأله درخت اشتاینر درگراف  $G(V, E)$  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 استفاده شده و نقاط «اشتااینر» خوانده می‌شوند. این یک مسأله کلاسیک NP-hard است و مفصلاً در ادبیات مربوط به خود مورد بحث قرار گرفته است [۴].

عوامل متعددی در کیفیت خدمات شبکه مؤثرند که یکی از مهم‌ترین آنها میزان تأخیر در تحویل بسته‌های اطلاعات است. تأخیر مشتمل بر دو بخش است: تأخیرانتظار (صف) و تأخیر انتشار (Propagation). تأخیرانتظار تابع پهنای باند گلوگاه و ویژگی‌های ترافیکی است [۱۲]. در شبکه‌های بی‌سیم تأخیر انتشار متناسب با تعداد پرش (Hop count) بین دو گره است [۹].

دو عامل سبب ناپایداری مسیر در شبکه‌های سیار بدون زیرساخت می‌شود که ناشی از طبیعت این شبکه‌هاست: ناپایداری اتصالات مسیر به دلیل جابه‌جایی گره‌ها (و خارج شدن از شعاع انتقال یکدیگر) و ناپایداری گره‌ها به دلیل محدودیت توان. از آنجا که گره‌ها در رویه ارسال، دریافت و پردازش اطلاعات توان صرف می‌کنند و با توجه به محدودیت ظرفیت باتری چنانچه توان آنها از حد بحرانی کمتر شود، دیگر نمی‌توانند در مسیریابی مشارکت داشته باشند و مسیر منقضی می‌گردد.

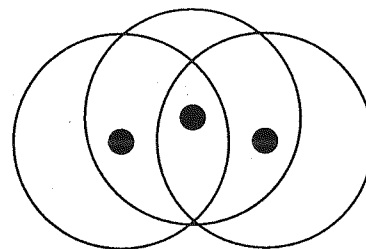
در [۲] برخی از تکنیک‌های اولیه مسیریابی چندپخش‌ی معرفی و مقایسه شده‌اند و کیفیت خدمات و قابلیت اطمینان به عنوان عوامل مهم در مسیریابی چندپخش‌ی در شبکه‌های سیار بدون زیرساخت مورد بحث قرار گرفته‌اند. همچنین نویسندگان یک پروتکل QoS تطبیقی برای مسیریابی تک‌پخش‌ی پیشنهاد کرده‌اند که در آن هر فرستنده بر اساس مقدار محاسبه شده معیار کیفیت خدمات، همسایگانی را برای ارسال بسته تقاضای مسیریانتخاب می‌کند که هزینه آنها از یک مقدار آستانه کمتر باشد. اولین الگوریتم مسیریابی تک‌پخش‌ی QoS محلی برای شبکه‌های بی‌سیم در [۹] معرفی شده است. در این مقاله از اطلاعات غیردقیق موقعیت گره‌ها استفاده می‌شود و زمان برقراری اتصال (مدت برآورد شده پایداری یک اتصال بین دو گره) به عنوان معیار کیفیت خدمات در نظر گرفته شده است.

پیش از آن در [۱۱] یک الگوریتم مسیریابی مبتنی بر شرکت‌پذیری (Associativity-based) ارائه شده بود که از معیار جدیدی تحت عنوان درجه پایداری وابستگی یا به عبارت دیگر درجه اتصال بین دو گره استفاده شده است. یک الگوریتم مسیریابی چندپخش‌ی با محدودیت تأخیر برای گروه‌های

امروزه با توسعه فناوری‌های ارتباطی، تقاضا برای استفاده از امکانات ارسال داده و پهنای باند افزایش 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، عملیات نجات (سیل، زلزله و نظیر آنها)، بازار خرده‌فروشی، ویدئوکنفرانس‌ها و غیره قابل استفاده هستند.

از مهم‌ترین ویژگی‌های شبکه‌های سیار می‌توان پهنای باند پایین، جابه‌جایی (پویایی توپولوژی) و محدودیت توان را نام برد. پهنای باند موجود در شبکه‌های بی‌سیم کمتر از شبکه‌های سیمی است و از این رو جمع‌آوری اطلاعات در حین ایجاد درخت مسیر هزینه‌بر است. پویایی شبکه نیز باعث ناپایداری اطلاعات شبکه می‌شود. از سوی دیگر بدون داشتن اطلاعات سراسری شبکه یافتن مسیر با کیفیت خدمات (QoS) تضمین شده مقدور نیست.

یکی از مهم‌ترین مسائل مطرح در این شبکه‌ها مسیریابی به ویژه در حالت ترافیک چندپخش‌ی است که یک فرستنده به بیش از یک گیرنده در شبکه داده ارسال می‌کند. چرا که در این شبکه‌ها مسیریاب (Router) ثابتی وجود ندارد و نیز کلیه گره‌ها می‌توانند جابه‌جا شوند و به طریق دلخواه به شبکه متصل شوند. پس گره‌های میزبان، خود به عنوان مسیریاب عمل می‌کنند و مسیر مورد نیاز به گره‌های دیگر شبکه را ابقا می‌کنند. از آنجا که هر گره شعاع انتقال محدودی دارد برای ارتباط با کل شبکه، یک مسیر از مبدأ به مقصد شامل تعدادی گره‌های میانی خواهد بود [۲] شکل (۱).



شکل (۱): مثالی از شبکه سیار بدون زیرساخت

در مسیریابی چندپخش‌ی هدف اصلی یافتن مسیری بین گره‌ها برای ارسال داده‌ها از یک یا چند فرستنده به چندین گیرنده است، به نحوی که مصرف منابع کمینه باشد. از جمله منابعی که کمینه کردن مصرف آنها مدنظر قرار می‌گیرد، پهنای باند، زمان و هزینه اتصال است. یک گروه چندپخش‌ی (Multicast Group) مجموعه‌ای از گره‌های شبکه است که نیاز دارند بخشی از اطلاعات خود را با هم به اشتراک بگذارند. مسأله

چندپختی پویا در [۸] پیشنهاد شده است که در آن تلاش بر این است که با تعیین حداقل تأخیر، کیفیت خدمات در سطح ثابتی حفظ شود. این الگوریتم به نحوی طراحی شده که می‌تواند درخت مسیر را متناسب با تغییرات عضویت گروه‌ها (اضافه شدن عضو جدید یا حذف عضو از گروه) تطبیق دهد [۶]. الگوریتم طوری طراحی شده که هنگامی که مقدار شاخص کیفیت بخشی از درخت از یک حد آستانه کمتر می‌شود، آن بخش از درخت را اصلاح می‌کند. تکنیکی که برای بازسازی درخت استفاده می‌شود محدودیت حداقل تأخیر را نیز حفظ می‌کند. ولی در آن امکان جابه‌جایی گره‌ها در نظر گرفته نشده است.

توان باتری نیز محدودیت بسیار جدی در بسیاری از کاربردهای شبکه‌های بدون زیرساخت است و به این دلیل به بازده انرژی در طراحی این شبکه‌ها توجه زیادی شده است. در این زمینه می‌توان به [۱۳] و [۱۴] اشاره کرد که به مسیریابی چندپختی و همه‌پختی (broadcast) کم‌مصرف در شبکه‌های بدون زیرساخت ایستا پرداخته‌اند. در این مقالات مسأله مسیریابی چندپختی در شبکه‌های بدون زیرساخت بی‌سیم با هدف کمینه کردن توان مصرفی در گره‌ها برای ارسال داده مورد مطالعه قرار گرفته است و در آنها توسعه یا ابداع روش‌های جدید مناسب برای شبکه‌های باتوپولوژی پویا تأکید شده است. در این مقاله، با توجه به دو عامل مؤثر در ناپایدار شدن درخت مسیر در شبکه‌های مورد مطالعه که تابع جابه‌جایی گره‌ها و محدودیت توان آنها هستند، مسأله مسیریابی چندپختی را در قالب یک مسأله بهینه‌سازی باهدف یافتن درخت‌های مسیر با حداکثر پایداری (پایداری اتصال‌ها و گره‌ها) و محدودیت تأخیر به عنوان معیار کیفیت خدمات در نظر گرفته‌ایم. همچنین فرض بر این است که پهنای باند به اندازه نیاز در اختیار است و محدودیتی روی آن وجود ندارد. به این ترتیب تأخیر سراسری یک مسیر از فرستنده به گیرنده به تأخیر انتشار تقلیل می‌یابد که با تعداد پرش متناسب است.

پس از مقدمه (بخش [۱-])، در بخش [۲-] فرضیه‌ها و مدل شبکه مطرح شده و در بخش [۳-] با استفاده از مفهوم دسته‌بندی در شبکه‌ها، الگوریتمی برای ایجاد زیرساخت مجازی در شبکه سیار بدون زیرساخت ارائه شده است. در بخش [۴-] ابتدا مدل ریاضی مسأله مسیریابی چندپختی برای شبکه سیار بدون زیرساخت دسته‌بندی شده باهدف حداکثر کردن پایداری مسیر و محدودیت تأخیر (تعداد پرش) ارائه شده و در پی آن الگوریتمی ابتکاری برای حل مسأله پیشنهاد شده است. مدل ریاضی مسأله برای یافتن درخت مسیریابی گره‌های مبدأ و مقصد با در نظر گرفتن حد بالای تأخیر مجاز ارائه شده است. بخش [۵-] به بررسی کارایی الگوریتم پیشنهادی

اختصاص دارد. عملکرد الگوریتم با استفاده از شبیه‌سازی شبکه‌های نمونه که به طور تصادفی ساخته شده‌اند مورد بررسی شده است. بخش [۶-] نیز به جمع‌بندی و پیشنهادات برای پژوهش‌های آتی می‌پردازد.

## ۲- فرضیات و مدل شبکه

۱. تقاضای ارسال داده و مدت مورد نیاز برای ارتباط (Session duration)، متغیری تصادفی با توزیع احتمال مشخص است و هربار تقاضای ارسال چندپختی به طور تصادفی از یکی از گره‌های شبکه می‌آید که شامل شناسه فرستنده، گیرنده‌ها و مدت مورد نیاز است. (این الگوریتم با رسیدن تقاضای ارسال داده از طرف یکی از گره‌های فرستنده فعال می‌شود).
۲. جابه‌جایی گره‌ها در شبکه تابع الگوی تصادفی معلومی است.
۳. شبکه با استفاده از الگوریتم مطرح شده در **Error! Reference source not found.** به نحوی دسته‌بندی شده که دسته‌ها با هم هم‌پوشانی ندارند.
۴. اطلاعات گره‌های موجود در هر دسته (شناسه، توان باقی‌مانده و آخرین اطلاعات موقعیت گره\*) در سردسته موجود است.
۵. گره‌های هر دسته به طور دوره‌ای پیغام سلام را منتشر می‌کنند. دریافت پیغام سلام از یک گره توسط سردسته به معنی وجود گره در آن دسته است. سردسته‌ها پس از دریافت پیغام‌های سلام، اطلاعات خود را به‌روز 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 تعداد گره میانی بین فرستنده و گیرنده است.
۸. مشارکت گره‌ها در فرآیند ارسال داده توأم با صرف انرژی است و میزان انرژی صرف شده تابع فاصله بین گره‌هاست.
۹. گره‌ها تازمانی می‌توانند در رویه مسیریابی شبکه فعال باشند که توان باقی‌مانده آنها از یک مقدار بحرانی بالاتر باشد. چنان‌چه توان گرهی به 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.

۱۰. پهنای باند به میزان موردنیاز فراهم است و محدودیتی در تخصیص کانال‌ها وجود ندارد.

\* زمان پیوند هر اتصال به صورت مدت تخمینی برقراری پیوند بین دو گره همسایه تعریف شده است. گره‌های همسایه به صورت دوره‌ای اطلاعات موقعیت خود را به یکدیگر منتقل می‌کنند و با استفاده از این اطلاعات زمان موردنظر را می‌توان از روش پیشنهادی در [۱۰] تخمین زد.

### ۳- الگوریتم جمع‌آوری اطلاعات مسیریابی

به دلیل ماهیت پویای شبکه‌های سیار، 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 این رو در این مقاله، تابع هزینه مسأله برابر با میزان ناپایداری مسیر در نظر گرفته شده است. 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 موردنیاز برای فرموله کردن مسأله بهینه‌سازی موردنظر، توان باقی‌مانده گره‌ها و آخرین وضعیت موقعیت آنها (برای تخمین زمان برقراری اتصال) است. 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).
۲. مجری به محض دریافت تقاضای ارسال به فهرست گره‌های دسته خود مراجعه می‌کند. اگر کلیه گیرندگان موردنظر در دسته فعلی باشند، فرآیند مسیریابی متوقف می‌شود. مجری بادر اختیار داشتن اطلاعات موردنیاز کلیه مسیرها رابه گیرنده‌های موجود در دسته خود به دست می‌آورد. مجری یک پیغام تأیید به فرستنده می‌فرستد که شامل شناسه گره‌های گیرنده‌ای است که در دسته فعلی حضور دارند و مسیر موردنیاز ارسال داده از فرستنده به آنها مشخص شده است. برای ارسال این پیغام به فرستنده، با توجه به متقارن بودن اتصالات شبکه،

مجری می‌تواند از مسیر برگشت مسیری که در گام اول طی شده استفاده کند.

۳. چنانچه حداقل یکی از گیرندگان موردنظر فرستنده در دسته فعلی نباشند، مجری یک پیغام تقاضای اطلاعات به کلیه سردسته‌های دیگر می‌فرستد. این پیغام شامل شناسه گره‌های گیرنده‌ای است که در دسته فعلی موجود نیستند. پس مسیریابینه 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 سردسته یک پیغام حاوی اطلاعات موردنیاز مسیریابی به مجری می‌فرستد. برای ارسال این پیغام از مسیر برگشتی استفاده می‌شود.

۵. مجری پس از دریافت اطلاعات موردنیاز کلیه گیرندگان، مسیرهای موردنیاز را با استفاده از الگوریتم مسیریابیدار بخش [۲-۴-] به دست می‌آورد و یک پیغام تأیید شامل مسیرهای به دست آمده (درخت) به گره فرستنده (مبدأ) ارسال می‌کند. این پیغام نیز از مسیر برگشت فرستاده می‌شود.

### ۴- مدل ریاضی مسأله مسیریابی و الگوریتم مسیر

#### پایدار

در این بخش ابتدا مدل ریاضی مسأله مسیریابی چندبخشی دومعیاره (اهداف ۱) کمینه کردن مجموع ناپایداری اتصالات از فرستنده به هر گیرنده (ناپایداری اتصال به صورت عکس زمان موردانتظار پایداری آن تعریف شده است) و (۲) کمینه کردن مجموع معکوس ظرفیت باتری باقی‌مانده گره‌های حاضر در مسیر و محدودیت تأخیر (که برحسب تعداد پرش از فرستنده تا گیرنده سنجیده می‌شود)، ارائه می‌شود و سپس در زیربخش [۲-۴-۲-] به ارائه یک الگوریتم ابتکاری مبتنی بر الگوریتم پریم برای حل این مسأله می‌پردازیم.

### ۴-۱- مدل ریاضی مسأله مسیریابی پایدار چندبخشی با

#### محدودیت تأخیر

پس از جمع‌آوری اطلاعات موردنیاز برای مسأله مسیریابی، سردسته مجری به منزله یک زیرساخت مجازی بوده که می‌تواند کلیه مسیرهای موردنیاز به گیرنده‌ها را به دست آورد. از آنجاکه در شبکه‌های بی‌سیم سیار اتصالات سیمی وجود

در جدول (۱) تعاریف پارامترها و نمادهای استفاده شده در مدل ریاضی فوق ارائه شده است.

جدول (۱): تعاریف نمادهای مورد استفاده در مدل ریاضی

تعریف	نماد
زمان مورد انتظار پایداری اتصال (i,j)	$T_{(i,j)}$
ظرفیت باقی‌مانده باتری گره i	$Res(i)$
مجموعه گره‌ها	$V$
مجموعه اتصالات	$E$
مجموعه گره‌های گیرنده از S	$Z$
حداکثر تعداد پرش مجاز (محدودیت تأخیر)	$Max-hop$

معادله (۱) هزینه منفصل شدن اتصالات‌های درخت مسیر را نشان می‌دهد که در آن معکوس مدت مورد انتظار پایداری یک اتصال به عنوان هزینه آن در نظر گرفته شده است. به این ترتیب اتصالاتی که پایداری کمتری دارند شانس پایین‌تری برای حضور در درخت مسیر پیدا می‌کنند. هزینه اتصالات‌هایی که در بیش از یک مسیر از فرستنده به گیرنده شرکت دارند به تعداد دفعات حضورشان در مسیرها در نظر گرفته شده است. چراکه تأثیر ناپایداری اتصالاتی که تنها به یک گره گیرنده (برگ) منتهی می‌شود نمی‌تواند با اتصالاتی که در چندین مسیر مشترک است، یکسان باشد.

معادله (۲) مجموع معکوس ظرفیت باتری‌های گره‌های ارسال‌کننده را نشان می‌دهد. از آنجا که ظرفیت باتری ویژگی گره است، برای تبدیل آن به معیار هزینه مبتنی بر اتصال، معکوس ظرفیت باتری باقی‌مانده گره آغازین یک اتصال به عنوان هزینه آن اتصال در نظر گرفته شده است.

محدودیت‌های (۳) و (۴) و (۵) محدودیت تشکیل درخت فراگیر هستند. محدودیت (۶) تضمین می‌کند که تأخیر (تعداد پرش) هر مسیر از فرستنده به هر یک از گیرندگان از میزان تأخیر مجاز کمتر باشد.

#### ۴-۲- الگوریتم ابتکاری تعیین مسیر چندپخش‌ی حداکثر

##### پایدار با محدودیت تأخیر

در این مرحله، به شرح الگوریتمی ابتکاری برای حل مسأله‌ای که مدل ریاضی آن در زیربخش [۲-۴-۱] ارائه شد، می‌پردازیم. این الگوریتم صرف‌نظر از اینکه مسیریابی اولیه یا اصلاح مسیری باشد که قبلاً تعیین شده، مسیریابی رابه دست می‌آورد. مسأله اصلاح مسیری 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 مسیریبه دلیل افزایش فاصله بین گره‌ها و خارج شدن از

ندارد، تابع هزینه به طور مستقیم برحسب 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 پیغام کنترلی است. اجرای دوباره الگوریتم زمان می‌برد و ارسال پیغام مستلزم صرف توان و پهنای باند است. از این رو در مدلی که ارائه شده تابع هزینه طوری در نظر گرفته شده که احتمال نیاز به اصلاح مسیر حداقل شود و کمینه کردن آن به معنی یافتن مسیرهایی است که حتی‌المقدور پایدار باشند.

ناپایداری مسیر تابع ناپایداری اتصالات و ناپایداری گره‌هاست. اتصالات (به دلیل جابه‌جایی گره‌هایی که در مسیر هستند) و در نتیجه خارج شدن از شعاع انتقال یکدیگر منقضی می‌شوند. گره‌ها نیز در معرض تمام شدن باتری هستند. صرف توان در گره‌ها به خاطر شرکت در مسیریابی است که بستگی به اندازه بسته داده دارد. به این ترتیب تابع هدف مسأله به صورت دوگانه کمینه کردن ناپایداری اتصالات انتخاب شده در کلیه مسیرهای از فرستنده به گیرنده‌ها و کمینه کردن مجموع معکوس توان باقی‌مانده گره‌های شرکت‌کننده در مسیر است. مسأله مسیریابی چندپخش‌ی با محدودیت تأخیر، با در نظر گرفتن متغیرهای زیر فرموله شده است:

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

$$y_{ijk} = \begin{cases} 1 & \text{اگر اتصال بین } i \text{ و } j \text{ در مسیر به مقصد } k \text{ باشد} \\ 0 & \text{در غیر این صورت} \end{cases}$$

$$Min \text{ Tree\_Disconnection\_Cost} = \sum_{k \in Z} \sum_{(i,j) \in E} (1/T_{(i,j)}) \times y_{ijk} \quad (1)$$

$$Min \text{ Sum\_Battery\_Cost} = \sum_{(i,j) \in E} (1/Res(i)) \times x_{ij} \quad (2)$$

Subject to

$$\sum_{(i,j) \in E} y_{ijk} - \sum_{(j,i) \in E} y_{jik} = 0, j \neq k; k \in Z, \quad (3)$$

$$\sum_{(i,j) \in E} y_{ijj} = 1 \text{ for all } j \in Z, \quad (4)$$

$$y_{ijk} \leq x_{ij} \text{ for all } (i,j) \in E; k \in Z, \quad (5)$$

$$\sum_{(i,j) \in E} y_{ijk} < Max\_Hop \text{ for all } k \in Z, \quad (6)$$

$$x_{ij} \in \{0,1\}^{|E|} \quad (7)$$

$$y_{ijk} \in \{0,1\}^{|E|}, k \in Z \quad (8)$$

شعاع انتقال یکدیگر باشد، مسأله اصلاح مسیر به مسأله کشف مسیراز گره  $i$  به گره  $z$  تبدیل می‌شود، با این فرض که تغییرات توپولوژی و توان کلیه گره‌ها را در زمان تصمیم‌گیری بدانیم.

مسأله مسیریابی پایدار که مدل ریاضی آن در بخش قبل ارائه شد، صورت چندمعیاره مسأله درخت اشتاینر با محدودیت تأخیر است. اضافه شدن تابع هدف کمینه کردن ناپایداری اتصالات درخت مسیر (معادله (۱))، این مسأله را پیچیده‌تر می‌کند. الگوریتمی که در اینجا ارائه شده از روش معرفی شده در [۲] 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 به دست آورد. بنابراین بخش دشوار این الگوریتم، یافتن درخت با کمترین هزینه و سپس تصمیم در مورد نحوه ادغام آن با درخت با کمترین تأخیر است.

الگوریتمی که برای تعیین درخت با کمترین هزینه با تأخیر محدود استفاده شده، بهبود یافته الگوریتم پریم است که هر مسیر را در محدوده تأخیر مشخصی نگه می‌دارد. در این الگوریتم برای ترکیب درخت‌های مختلف از زیرروال 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 پریم است و به لحاظ زمان محاسبات وضعیت بهتری دارد.

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  $G=(V,E)$ ، زمان پایداری اتصال  $(i,j)$ ، ظرفیت باتری باقی مانده گره  $i$  در زمان  $t$   $Res(i,t)$ ، گره فرستنده  $s \in V$ ، مجموعه گره‌های گیرنده  $Z \subseteq V \setminus s$ ، زمان شروع ارسال داده از مسیر،  $T$  حداقل زمان مورد نیاز برای پایداری مسیر،  $\Delta$  حداکثر تأخیر مجاز مسیر فرستنده به گیرنده. خروجی: درخت پایدار  $T=(V_T, E_T)$  با تأخیر محدود که از  $s$  ریشه گرفته و شامل کلیه گره‌های  $Z$  می‌شود.

۱. با استفاده از تابع  $DCSP$  (کوتاه‌ترین مسیر با تأخیر محدود) [۲] و با در نظر گرفتن  $Im \times m$  به عنوان ماتریس تأخیر (جریمه تأخیر هر اتصال برابر ۱) و  $DC_m \times m = \{1/T_{(i,j)}\}$

به عنوان هزینه و محدودیت تأخیر  $\Delta$ ، درخت  $T_1=(V_1, E_1)$  را که از  $s$  ریشه گرفته و حداکثر تعداد ممکن گره‌های مقصد  $Z$  را شامل می‌شود، به دست آورید.

۲. با استفاده از تابع  $DCSP$  و با در نظر گرفتن  $Im \times m$  به عنوان ماتریس تأخیر و  $Pm \times m$  به عنوان هزینه اتصالات  $(P_{(i,j)}=1/Res(i))$  و محدودیت تأخیر  $\Delta$ ، درخت  $T_2=(V_2, E_2)$  را که از  $s$  ریشه گرفته و حداکثر تعداد ممکن گره‌های مقصد  $Z$  را شامل می‌شود، به دست آورید.

۳. اگر  $Z \subseteq V_1, Z \subseteq V_2$ ، درخت‌های  $T_1$  و  $T_2$  را ترکیب کنید، به گام ۶ بروید.

۴. با استفاده از الگوریتم کوتاه‌ترین مسیر پریم و با در نظر گرفتن  $Im \times m$  به عنوان ماتریس هزینه تأخیر، درخت  $T_3=(V_3, E_3)$  را که از  $s$  ریشه گرفته و کلیه گره‌های مقصد  $Z$  را فرا می‌گیرد، به دست آورید.

۵. درخت‌های  $T_1$  و  $T_2$  و  $T_3$  را برای به دست آوردن درخت مسیر چندبخشی ترکیب کنید.

۶. حلقه‌ها را از درخت ترکیبی  $T$  حذف کنید.

هنگام ترکیب درخت‌ها ممکن است حلقه ایجاد شود. حلقه‌ها را با شناسایی گره‌هایی که بیش از یک اتصال ورودی دارند، به سادگی می‌توان مشخص کرد. وجود حلقه علامت وجود بیش از یک مسیر (یکی در  $T_3$  و دیگری در  $T_1$  و  $T_2$ ) از یک گره مشترک به گره مورد نظر است. برای شکستن حلقه باید بخشی از مسیر در درخت  $T_1, T_2$  یا  $T_3$  را حذف کنیم.

الگوریتم فوق همواره می‌تواند یک درخت با تأخیر محدود به دست دهد مشروط بر اینکه چنین درختی وجود داشته باشد. گام‌های ۱، ۲ و ۴ این الگوریتم پیچیدگی مشابه الگوریتم پریم دارند که حداکثر  $O(m)$  است ( $m$  تعداد یال‌های گراف است). پیچیدگی گام آخرین  $O(n)$  است. به این ترتیب پیچیدگی کلی این الگوریتم  $O(m)$  خواهد بود.

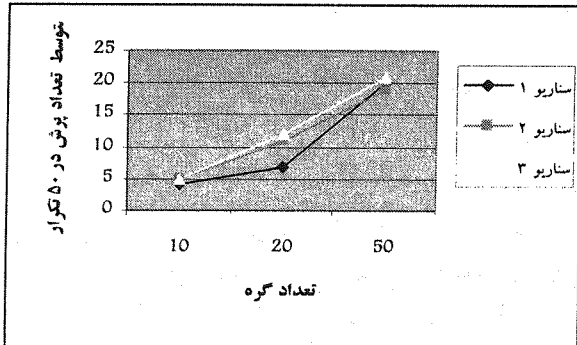
## ۵- نتایج شبیه‌سازی

برای بررسی کارایی الگوریتم پیشنهادی بخش قبل از شبیه‌سازی استفاده شده است. سه شبکه با ابعاد (تعداد گره) ۱۰، ۲۰ و ۵۰ در منطقه‌ای با مساحت  $100 \times 100$  شبیه‌سازی شده‌اند. ابتدا با استفاده از الگوریتم معرفی شده در [۴]، شبکه دسته‌بندی شده و سردهسته‌ها مشخص می‌شوند. از آنجا که هدف از این شبیه‌سازی، بررسی عملکرد الگوریتم مسیریابی

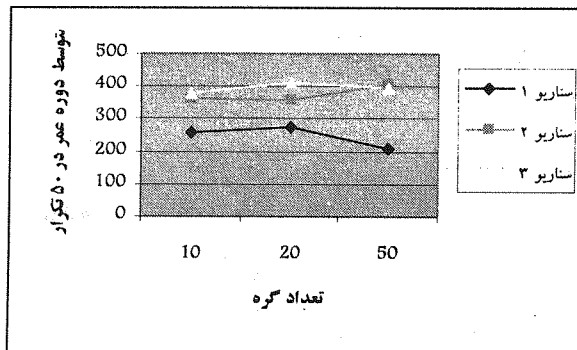
شکل‌های ۲ تا ۴ نتایج شبیه‌سازی (متوسط مقادیر شاخص‌های عملکرد) را برای سناریوهای آزمایش شده نشان می‌دهند. نتایج شبیه‌سازی تفاوت قابل توجهی در تعداد پرش سه سناریو مورد بررسی نشان نمی‌دهند (شکل (۲)). هرچندکه سناریو ۱ عملکرد نسبتاً بهتری دارد ولی شاخص دوره عمر سناریوهای دوم و سوم به میزان قابل توجهی بالاتر از سناریو اول است (شکل (۳)). می‌توان مشاهده کرد که تعداد گره‌های شبکه تأثیر چندانی در دوره عمر شبکه ندارند. در شکل (۴) نیز برتری سناریو سوم در کاهش توان مصرفی نسبت به سناریو اول و دوم مشهود است. در جدول (۲) عملکرد سه سناریو از لحاظ میزان پایداری مسیر مقایسه شده است.

جدول (۲): مقایسه دوبره دو تعداد دفعات اصلاح مسیر RRF در سناریوهای شبیه‌سازی (Re\_Route Freq.)

$S_1$ vs. $S_2$	$S_2$ vs. $S_3$	$S_1$ vs. $S_3$	تعداد گره‌ها
$\bar{x}$	$\bar{x}$	$\bar{x}$	
۱۷.۶٪	۱۹.۶٪	۱۹.۴٪	۱۰
۱۴.۸٪	۱۵.۶٪	۱۴.۶٪	۲۰
۱۰.۸٪	۱۱.۷٪	۹.۲٪	۵۰

$$x = \frac{RRF(a \lg_1) - RRF(a \lg_2)}{RRF(a \lg_1)}$$


شکل (۲): شاخص متوسط تعداد پرش



شکل (۳): شاخص متوسط دوره عمر شبکه

چندپخشی پیشنهادی است، برای پرهیز از پیچیدگی فرض شده دسته‌ها (به لحاظ موقعیت جغرافیایی) ثابتند. به این ترتیب چنانچه گرهی جابه‌جا شود و از حوزه سردهسته خود خارج شود با استفاده از اطلاعات ردیابی شده، عضویت گره‌ها به دسته‌ها بروز می‌شود. همین‌طور ممکن است گره‌ها به دلیل ازدست دادن توان (باتری) عملاً از شبکه خارج شوند. چنانچه یک گره سردهسته از شبکه خارج شود، نزدیک‌ترین گره دسته مربوط به جای آن انتخاب می‌شود.

تقاضای ارسال بسته به پورتصادفی از فرستنده‌ها می‌رسد. به محض دریافت تقاضای ارسال توسط سردهسته، الگوریتم جمع‌آوری اطلاعات شروع به کار می‌کند.

پس از ارسال بسته تقاضای اطلاعات و دریافت جواب از دسته‌ها، سردهسته 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 به طور دوره‌ای به سردهسته‌ها منتقل می‌شود و عدم دریافت موقعیت یک گره توسط سردهسته آن به معنی جابه‌جایی گره و رفتن به یک دسته دیگر است. به محض دریافت این اطلاعات، جداول اطلاعات سردهسته‌ها بروز می‌شود.

مدل جابه‌جایی گره‌ها در شبکه، راه‌پیمایی تصادفی (Random Walk) در نظر گرفته شده که از مدل‌های متداول در مطالعه شبکه‌های سیار است ([1], [7]). در این مدل هر گره با انتخاب مقدار سرعت از بازه  $(v_{min}, v_{max})$  و جهت حرکت بین  $(0, 2\pi)$  برای مدت زمان معینی حرکت می‌کند. پس از طی زمان مورد نظر، گره سرعت و زاویه جدیدی انتخاب کرده و به حرکت ادامه می‌دهد. در صورت رسیدن به مرز منطقه کاری شبکه، گره جهت جدیدی انتخاب می‌کند.

سه سناریو برای مقایسه در نظر گرفته شده است. سناریو اول ( $S_1$ ) مسأله مسیریابی چندپخشی را با هدف کمینه کردن ناپایداری اتصالات (تأثیر جابه‌جایی واحدهای سیار) در نظر می‌گیرد. در سناریوی دوم ( $S_2$ ) یافتن مسیریابی با حداقل ناپایداری گره‌ها (محدودیت توان) مدنظر بوده و سناریوی سوم ( $S_3$ ) از مدل پیشنهادی در این مقاله (کمینه کردن توأم ناپایداری ناشی از جابه‌جایی و محدودیت توان گره‌ها) استفاده می‌کند.

برای هر سناریو شبیه‌سازی ۵۰ بار تکران شده و هریک متوسط تعداد پرش مسیر (تأخیر)، دوره عمر شبکه (مدت زمان از شروع به فعالیت شبکه تا خارج شدن اولین گره از شبکه به دلیل اتمام باتری) و توان مصرفی مورد نیاز برای پاسخ دادن به تعداد مشخصی تقاضای مسیر به عنوان شاخص‌های عملکرد اندازه‌گیری شده‌اند.

Chen X.; Wu J.; "Multicasting Techniques in Mobile Ad Hoc Networks", in *The Handbook of Ad hoc Wireless Networks*, Edited by Ilyas M., The CRC Press, p.p. 2\_1-2\_16 2003.

Feng G.; Yum T. P.; "Efficient multicast routing with delay constraints", *International Journal of Communication Systems*, vol. 12, p.p. 181-95, 1999.

Garey M. R.; Johnson D. S.; *Computers and intractability: a guide to the theory of NP-completeness*, Freeman, New York, 1979.

Liu J. -S.; Lin C. -H. R.; "Energy-efficiency clustering in wireless sensor networks", *Ad Hoc Networks*, vol. 3, 3, p.p. 371-388, 2005.

Oliveira C.; Pardalos P.; "A survey of combinatorial optimization problems in multicast routing", *Computers & Operations Research*, vol. 32, 8, p.p. 1953-1981, 2005.

Siomina I.; "Simulation of Power-Aware Broadcast Communication in Ad Hoc Networks", Master's Thesis, Department of Computer and Systems Sciences, Stockholm University, 2004.

Sriram R.; Manimaran G.; Siva Ram Murthy C.; "A rearrangeable algorithm for the construction of delay-constrained dynamic multicast trees", *IEEE/ACM Transactions on Networking*, vol. 7, 4, p.p. 514-29 1999.

Stojmenovic I.; Russell M.; Vukojevic B.; "Depth First Search and Location Based Localized Routing and QoS Routing in Wireless Networks", *Proceedings of the first Conference on Parallel Processing Washington DC USA*, p.p. 173-180, 2000.

Su W.; Lee S. J.; Gerla M.; "Mobility prediction in wireless networks", in *Proceedings of IEEE MILCOM*, vol. 1, p.p. 491-495, 2000.

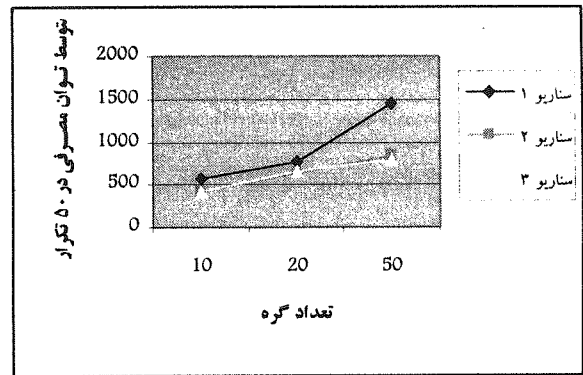
Toh C.-K.; "Associativity Based Routing For Ad Hoc Mobile Networks", *Wireless Personal Communications Journal, Special Issue on Mobile Networking and Computing Systems*, vol. 4, 2, p.p. 103-139, 1997.

Wang Z.; Crowcroft J.; "Quality-of-service routing for supporting multimedia applications", *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*, vol. 14, 7, p.p. 1228-1234, 1996.

Wieselthier J.; Nguyen G.; Ephremides A.; "Algorithms for energy-efficient multicasting in static ad hoc wireless networks", *Mobile Networks and Applications*, vol. 6, 3, p.p. 251-263, 2001.

Wieselthier J.; Nguyen G.; Ephremides A.; "Energy-efficient broadcast and multicast trees in wireless networks", *Mobile Networks and Applications*, vol. 7, 6, p.p. 481-492, 2002.

[۲]



[۳]

[۴]

[۵]

[۶]

شکل (۴): شاخص متوسط توان مصرفی

## ۶- جمع‌بندی و پژوهش آتی

[۷]

در این مقاله با استفاده از مفهوم دسته‌بندی شبکه الگوریتمی برای اشتراک اطلاعات بین گره‌ها و ایجاد زیرساختی مجازی برای 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. تابع هدف مسأله مسیریابی به گونه‌ای تعریف شد که نیاز به اصلاح مسیر کمینه شود. به عبارت دیگر، مسیری با حداکثر میزان پایداری تعیین شود. با توجه به NP-complete بودن مسأله، الگوریتمی ابتکاری برای حل آن پیشنهاد شد. کارایی این الگوریتم با استفاده از شبیه‌سازی چند شبکه تصادفی با ابعاد متوسط نشان داده شد. برای پژوهش آتی، قصد داریم تا الگوریتم پیشنهادی را به صورت توزیع شده (distributed) پیاده‌سازی کنیم. چرا که با بزرگ شدن ابعاد شبکه، جمع‌آوری و متمرکز کردن کلیه اطلاعات سربار ترافیکی بالایی به شبکه تحمیل می‌کند و امکان تداخل بین پیام‌های کنترلی به وجود می‌آید.

[۸]

بررسی تأثیر دیگر الگوهای جابه‌جایی گره‌ها بر کارایی الگوریتم مسیریابی از جمله پژوهش‌های پیشنهادی آینده است.

[۹]

پیشنهادی را به صورت توزیع شده (distributed) پیاده‌سازی کنیم. چرا که با بزرگ شدن ابعاد شبکه، جمع‌آوری و متمرکز کردن کلیه اطلاعات سربار ترافیکی بالایی به شبکه تحمیل می‌کند و امکان تداخل بین پیام‌های کنترلی به وجود می‌آید.

[۱۰]

بررسی تأثیر دیگر الگوهای جابه‌جایی گره‌ها بر کارایی الگوریتم مسیریابی از جمله پژوهش‌های پیشنهادی آینده است.

[۱۱]

پیشنهادی را به صورت توزیع شده (distributed) پیاده‌سازی کنیم. چرا که با بزرگ شدن ابعاد شبکه، جمع‌آوری و متمرکز کردن کلیه اطلاعات سربار ترافیکی بالایی به شبکه تحمیل می‌کند و امکان تداخل بین پیام‌های کنترلی به وجود می‌آید.

[۱۲]

بررسی تأثیر دیگر الگوهای جابه‌جایی گره‌ها بر کارایی الگوریتم مسیریابی از جمله پژوهش‌های پیشنهادی آینده است.

[۱۳]

## ۷- تقدیر و تشکر

نویسندگان بر خود لازم می‌دانند تا از مرکز تحقیقات مخابرات ایران که بخشی از حمایت‌های مالی این پروژه توسط ایشان صورت گرفته است، تشکر نمایند.

[۱۴]

## ۸- منابع

Camp T.; Boleng J.; Davies V.; "A Survey of Mobility Models for Ad Hoc Network Research", *Wireless Communication & Mobile Computing (WCMC): Special issue on Mobile Ad Hoc Networking: Research, Trends and Applications*, vol. 2, 5, p.p. 483-502, 2002.