ترکیب بهینه مسیریابی و اختصاص دامنه ارسال در شبکه‌های بی‌سیم اقتضائی

محمد خلیلی درمنی [۱]، استادیار

۱- باشگاه پژوهشگران جوان و نخبگان، واحد خمین، دانشگاه آزاد اسلامی، خمین، ایران - mkhalili@iaukhomein.ac.ir

چکیده: یک شبکه بی‌سیم اقتضائی، مجموعه‌ای از گره‌های بی‌سیم با انرژی کم است که باید بدون زیرساخت و مدیریت متمرکز بتوانند با انعطاف‌پذیری بالایی با یکدیگر ارتباط داشته باشند. دامنه و قدرت ارسال گره‌ها نقش مهمی در توان مصرفی این شبکه‌ها ایفا می‌کند و الگوریتم‌های اختصاص دامنه تلاش می‌کنند که دامنه ارسال بهینه‌ای را برای گره‌ها مشخص کنند. البته، اختصاص دامنه بر روی توپولوژی شبکه بی‌سیم و مسئله مسیریابی تأثیر می‌گذارد. اگرچه در تحقیقات مختلف، مسیریابی و اختصاص دامنه به‌صورت جداگانه مدنظر قرار گرفته، اما ثابت شده است که بکار بستن هم‌زمان مسیریابی و اختصاص دامنه باعث بهبود کارآیی شبکه خواهد شد. در این مقاله، ترکیب مسئله اختصاص دامنه و مسیریابی در شبکه‌های بی‌سیم به‌صورت یک بهینه‌سازی غیرخطی مدل شده است که می‌تواند به درک کامل‌تر مسئله به محققان کمک کند و به‌عنوان معیاری برای طراحی الگوریتم‌هایی در آینده قرار گیرد، با این حال، حل مسئله بهینه‌سازی ارائه شده نیاز به یک مدیریت متمرکز دارد و برای شبکه‌های بی‌سیم بزرگ غیرعملی و غیرممکن است. بنابراین در این مقاله با استفاده از روش زیرگرادیان و تکنیک تفکیک، یک الگوریتم توزیع‌شده برای حل مسئله اختصاص دامنه و مسیریابی ارائه شده است. نتایج شبیه‌سازی نشان می‌دهد که الگوریتم پیشنهادی نسبت به حالت بهینه، مصرف توان و تأخیر بیشتری دارد، اما قابلیت اطمینان شبکه را بهبود می‌دهد.

واژه‌های کلیدی: شبکه بی‌سیم اقتضائی، اختصاص دامنه، زیرگرادیان، بهینه‌سازی.

Optimal Combination of Routing and Transmission Range Assignment in Wireless Ad Hoc Networks

M. Khalily-Dermany[1], Assistant Professor

1- Young Researchers and Elite Club, Khomein Branch, Islamic Azad University, Khomein, Iran, Email: mkhalili@iaukhomein.ac.ir

Abstract: A wireless ad hoc network consists of a collection of wireless nodes with bounded energy that is capable communicating with each other reliably without the use of a network infrastructure or any centralized administration. Transmission range and power of nodes play a dominant role in energy consumption and range assignment, algorithms try to specify an optimal transmission range for nodes. Transmission range effects on network topology and the optimal route between nodes. Although routing and range assignment have been considered by researchers separately, there is a few highlights research about employing routing and range assignment jointly while this combination leads in improving network performance. In this paper, the combination of range assignment and routing problem is modeled as an optimization problem. Although, the mathematical formulation can help us to estimate the problem characteristic and figure out the firmness of it, solving this optimization problem is impossible and impractical in the large-scale wireless network. By utilizing sub-gradient and decomposition methods, a distributed algorithm is proposed where applied range assignment and routing problem jointly. Simulation results show that the distributed algorithm has more power consumption and delay with respect to optimal model but it provides more reliability for networks.

Keywords: Wireleless ad hoc networks, range assignment, sub-gradient, optimization.

تاریخ ارسال مقاله: ۱۳۹۶/۵/۲۰
تاریخ اصلاح مقاله: ۱۳۹۶/۸/۱۷ و ۱۳۹۶/۱۰/۳۰
تاریخ پذیرش مقاله: ۱۳۹۷/۱/۲۰
نام نویسنده مسئول: محمد خلیلی درمنی
نشانی نویسنده مسئول: ایران - خمین – دانشگاه آزاد اسلامی واحد خمین.

۱ -مقدمه

شبکه بی‌سیم اقتضائی[1]، شبکه‌ای متشکل از تعداد زیادی گره است که در مجاورت یکدیگر قرار گرفته‌اند و عمل انتقال اطلاعات بین آن‌ها انجام می‌شود. ساختار این شبکه‌ها به‌صورت تصادفی است و در زمان تغییر می‌کند، بنابراین هر گره در این شبکه‌ها، باید به‌صورت مستقل عمل کند[۱]. به‌عبارت‌دیگر، سازماندهی و پیکربندی شبکه‌های بی‌سیم اقتضائی، باید خودکار باشد و گره‌ها باید بتوانند اتصال شبکه را به‌طور خودکار ایجاد و حفظ کنند[۲].

گره‌های شبکه‌های بی‌سیم اقتضائی، دامنه ارسال محدودی دارند و گره‌ها نمی‌توانند به‌صورت تک‌گامه و مستقیم اطلاعات خود را برای تمام گره‌های مقصد ارسال کنند. بنابراین عمل انتقال اطلاعات در این شبکه‌ها به‌صورت چندگامه انجام می‌شود[۳]. البته، دامنه ارسال گره، یک فاکتور تعیین کننده است که تعداد همسایگان گره را مشخص می‌کند و با تغییر دامنه ارسال گره، مسیر انتقال اطلاعات بین مبدأ و مقصد تغییر خواهد کرد. بنابراین، در کل عمر شبکه بی‌سیم نمی‌توان، دامنه ارسال گره‌ها را ثابت فرض کرد و لازم است که در هر لحظه و متناسب با چگالی شبکه و جریان‌های ترافیکی، دامنه ارسال گره‌ها مشخص شود[۲].

در تحقیقات مختلف، فرض شده است که گره‌های شبکه با حداکثر دامنه ارسال بسته‌های اطلاعاتی را ارسال کنند. اما، استفاده از دامنه ارسال حداکثری توسط گره‌های شبکه، علاوه بر مصرف انرژی بیشتر، باعث می‌شود که تعداد مسیرها در لایه شبکه افزایش پیدا کند و درنتیجه تصمیم‌گیری برای انتخاب مسیر را پیچیده‌تر کند. افزایش حجم پردازش‌های مربوط به ارزیابی کیفیت لینک‌ها و تداخل امواج گره‌ها از دیگر مشکلاتی است که استفاده از دامنه ارسال حداکثری به همراه دارد. بنابراین برای کاهش مصرف انرژی گره‌های شبکه، افزایش طول عمر شبکه و کاهش پیچیدگی پروتکل‌های دسترسی به رسانه و تداخل امواج، انتخاب یک توان ارسال مناسب برای هر گره لازم است. این فرآیند معمولاً توسط مکانیزم‌های مختلف اختصاص دامنه انجام می‌شود [۴]. تکنیک‌ها و مسائل مختلفی در مورد اختصاص دامنه مطرح می‌شود، اما باید در طراحی الگوریتم‌های اختصاص دامنه مسائلی مانند مقیاس‌پذیری و توزیع شدگی الگوریتم، عدم نیاز به اطلاعات موقعیتی، پهنای باند محدود، متصل بودن، قابلیت اطمینان و سادگی در نظر گرفته شود[۵].

در این تحقیق با هدف بهینه‌سازی مصرف انرژی، اختصاص دامنه ارسال بهینه مدنظر قرار گرفته است. برای دستیابی به این هدف، مسئله اختصاص دامنه و مسیریابی در شبکه‌های بی‌سیم به‌صورت یک مدل بهینه‌سازی بیان می‌گردد. ارائه این مدل بهینه‌سازی به محققان در درک پیچیدگی و شناخت مسئله کمک خواهد کرد، اما حل آن در یک شبکه بزرگ و با تعداد گره زیاد، غیرعملی و غیرممکن است. زیراکه جمع‌آوری اطلاعات مربوط به تمام گره‌های شبکه در یک گره، ایجاد مدل بهینه‌سازی، حل آن و در نهایت ارسال نتیجه حل مسئله به تمام گره‌ها به زمان، حافظه و پردازش فراوانی نیاز دارد. بنابراین بعد از فرموله کردن مسئله، یک الگوریتم توزیع‌شده برای حل این مسئله در زمان قابل‌قبول و جواب بهینه ارائه شده است. در ایجاد الگوریتم پیشنهادی از روش زیرگرادیان[2] و تکنیک تفکیک جریان‌های شبکه استفاده شده است. در الگوریتم توزیع‌شده پیشنهادی، تصمیم‌گیری اختصاص دامنه ارسال گره‌ها توسط خود گره‌های بی‌سیم و به‌صورت محلی انجام خواهد شد که با توجه به میزان انرژی باقیمانده و میزان جریان تولیدی گره‌ها، دامنه ارسال مناسب را انتخاب کنند. چالش‌های این مقاله به‌صورت زیر اعلام می‌شود.

- در این تحقیق ارزیابی تحلیلی از ترکیب اختصاص دامنه و مسیریابی بهینه در شبکه بی‌سیم به‌صورت یک مسئله بهینه‌سازی غیرخطی ارائه شده است.
- با استفاده از روش زیرگرادیان و تکنیک تفکیک جریان‌های شبکه، یک الگوریتم توزیع‌شده تکرار شونده برای اختصاص دامنه و مسیریابی در شبکه‌های بی‌سیم ارائه شده است.

در بخش دوم از مقاله حاضر، تحقیقات انجام شده در مورد ترکیب اختصاص دامنه و مسیریابی در شبکه‌های بی‌سیم اقتضائی بررسی شده است. سپس در بخش سوم، اختصاص دامنه و مسیریابی بهینه در شبکه‌های بی‌سیم اقتضائی مدل‌سازی شده است و مسئله به‌صورت بهینه‌سازی غیرخطی ارائه می‌گردد. در بخش چهارم با استفاده از روش زیرگرادیان و تکنیک تفکیک مسائل جریان شبکه، یک الگوریتم توزیع‌شده برای حل مسئله ارائه گردیده است. در انتها و در بخش پنجم، نتیجه‌گیری و کارهای آینده ارائه شده است.

۲ -پیشینه تحقیق

با وجود اینکه تحقیقات متنوعی در مورد اختصاص دامنه و مسیریابی در شبکه‌های بی‌سیم انجام شده است، اما این دو موضوع به‌صورت مجزا مدنظر قرار گرفته است و تحقیقات محدودی در مورد انجام مسیریابی و اختصاص دامنه به‌صورت هم‌زمان انجام شده است. در این بخش از مقاله، ابتدا مختصری در مورد اختصاص دامنه ارسال در گره‌های شبکه‌های بی‌سیم مطالبی عنوان می‌شود و سپس تحقیقاتی که مسیریابی و اختصاص دامنه در شبکه‌های بی‌سیم را به‌صورت هم‌زمان مدنظر قرار داده‌اند، بررسی می‌شوند.

اساس روش‌های اختصاص دامنه، کنترل مجموعه همسایگانی است که یک گره می‌تواند با آن‌ها ارتباط برقرار کند. این مسئله کاملاً با کنترل توان ارسال گره‌ها در ارتباط است و در تحقیقات مختلفی، اختصاص دامنه ارسال و اختصاص توان ارسال را معادل هم فرض کرده‌اند. اما این فرض در صورتی صحیح است که مدل خرابی مسیر[3] برای تمام گره‌ها مشابه باشد و اثر shadowing و محو شدگی[4] نادیده گرفته شود [۶]. به‌عبارت‌دیگر، در روش‌های اختصاص دامنه فرض می‌شود که دو گره با توان ارسال یکسان، دارای دامنه ارسال یکسانی خواهند بود، درحالی‌که اثر shadowing و محو شدگی باعث می‌شود که در واقعیت متفاوت باشند [۷].

درحالی‌که روش‌های اختصاص دامنه یا RA[۵]، برای هر گره یک دامنه ارسال مشخص می‌کنند، در روش‌های CTR[۶]، حداقل دامنه ارسال مورد نیاز، برای گره‌ها مشخص می‌شود و اگر دامنه ارسال گره از مقدار مشخص شده کمتر باشد، ممکن است اتصال گره‌های شبکه تحت تأثیر قرار بگیرد. در ادامه، برخی از تحقیقات انجام شده در مورد اختصاص دامنه در شبکه‌های بی‌سیم، معرفی شده‌اند.

عدد جادویی: اولین ایده برای اختصاص دامنه بدین‌صورت است که گره فقط با m همسایه نزدیک خود ارتباط برقرار کند. عدد m به نحوی تعیین شود که بتوان به هدف تعیین شده (مثلاً گذردهی و یا متصل بودن) رسید. ساده‌ترین وضعیت حالتی است که امکان تعیین مقدار m به‌صورتی باشد که وابستگی به گراف اولیه نداشته باشد. چنین مقدار ثابتی از m به‌صورت توجیه‌پذیری عدد معجزه‌گر نامیده می‌شود و تلاش‌های بسیاری برای اثبات وجود آن صورت گرفته است. برای اطلاعات بیشتر در مورد این عدد جادویی به [۸] مراجعه فرمائید. البته در برخی از روش‌هایی که در این گروه قرار می‌گیرند، یک کران بالا و پائین برای تعداد همسایه‌های هر گره مشخص می‌شود. الگوریتم‌هایی مانند K-neighbor graph، K-Neigh، K-Neghlev و XTC و... به این روش اختصاص دامنه را انجام می‌دهند [۹].

اطلاعات موقعیت گره‌ها: الگوریتم‌هایی مانند R&M، LMST[۷]، FLSS[۸] و GAF[۹] و غیره بر اساس موقعیت جغرافیایی گره اختصاص دامنه را انجام می‌دهند [۱۰]. این الگوریتم‌ها ناحیه‌ای که گره‌ها در آن قرار گرفتند را به نواحی کوچک‌تر فرضی تقسیم می‌کنند و بسته به موقعیت فیزیکی گره و قرارگیری آن در هر یک از نواحی فرضی ایجاد شده، دامنه ارسال گره را مشخص می‌کنند.

زاویه ارتباط بین گره‌ها و فاصله بین آن‌ها: الگوریتم‌هایی که به این روش اختصاص دامنه را انجام می‌دهند بر اساس زاویه بین گره‌های اطراف یک گره و فاصله آن‌ها اختصاص دامنه را انجام می‌دهند. در [۱۱]، الگوریتم جهت‌دار CBTC[۱۰] را ارائه شده است که ایجاد شبکه متصل را تضمین می‌کند و شرایطی برای ایجاد متصل بودن در شبکه ایجاد می‌کند. در این الگوریتم هر گره باید چندین آنتن جهت‌دار داشته باشد و با کمک آن‌ها شرایطی برای ایجاد متصل بودن در شبکه ایجاد کند که باعث افزایش قیمت گره‌های شبکه خواهد شد. الگوریتم‌های دیگری مانند Di-ATC[۱۱]، DisRNG[۱۲] و YG[۱۳] و غیره نیز در این گروه قرار می‌گیرند.

ساختار تئوری گراف: الگوریتم‌هایی برای اختصاص دامنه و همبندی گراف پیش‌تر در نظریه گراف مطرح بوده‌اند و از آنجائی که شبکه‌های بی‌سیم با گراف مدل می‌شوند، می‌توان از آن‌ها برای اختصاص دامنه استفاده کرد. الگوریتم‌هایی مانند RNG[۱۴]، GG[۱۵]، DT[۱۶] و... در این گروه قرار می‌گیرند. در اختصاص دامنه به روش همسایگی نسبی RNG، در صورتی، یک یال بین گره i و j وجود خواهد داشت که هیچ گره kای نزدیک‌تر به گره i و j نسبت به دیگری وجود نداشته باشد. عملکرد اختصاص دامنه گراف گابریل GG همانند اختصاص دامنه RNG تعریف می‌گردد. در این روش نیز گره i و j فقط در حالتی به هم متصل می‌مانند که در دایره‌ای به قطر $d(i,j)$ در اطراف گره‌های i و j هیچ گره دیگری به‌جز گره‌های i و j وجود نداشته باشد. برای مطالعه دقیق‌تر این روش‌ها به [۱۲،۹] مراجعه فرمائید.

از سوی دیگر، مسیریابی در شبکه‌های بی‌سیم اقتضائی یکی از مسائل مورد توجه محققان مختلف بوده است و تحقیقات فراوانی در این مورد انجام شده است. پروتکل‌ها و روش‌های مطرح در مسیریابی شبکه‌های بی‌سیم در [۱۳] معرفی و مورد مقایسه قرار گرفته‌اند. اما نکته‌ای که باید توجه داشت این است که مسیریابی در شبکه‌های اطلاعاتی را می‌توان به‌صورت یک مسئله بهینه‌سازی مطرح کرد که در ابتدای بخش سوم مقاله حاضر، مسئله بهینه‌سازی مسیریابی توصیف شده است.

در تحقیقات مختصری مسیریابی و اختصاص دامنه با هم و به‌صورت هم‌زمان مطرح شده است که در برخی از این الگوریتم‌ها، وجود مسیر بین گره‌ها در حین اختصاص دامنه بررسی می‌شود. برای مثال در الگوریتم ASCENT که در [۱۴] ارائه شده است، سعی در سازگار نمودن خود با نیاز ارتباطی بین گره‌ها می‌نماید. این سازگاری با متحد کردن گره‌هایی که معمولاً در ارتباطات به‌صورت غیرفعال می‌باشند، عمل می‌کند و ارتباط یک‌گامی را به چندگامی تبدیل می‌کند. این عملیات با ارتباطاتی که در حال اجرا در مسافت‌های راه‌دور، با هزینه زیاد و خطای فراوان انجام می‌شود، شروع می‌گردد. در [۱۵]، خلیلی-درمنی مسئله اختصاص دامنه و مسیریابی چندپخشی در شبکه‌های حسگر بی‌سیم را با هدف افزایش طول عمر، را به‌صورت یک مسئله بهینه‌سازی مدل کردند. مدل ارائه شده توسط ایشان با استفاده از کدگذاری شبکه و برای جریان‌های چندپخشی است. همچنین خلیلی-درمنی و نجفی-آرانی در [۱۰]، مسئله کنترل توپولوژی و اختصاص دامنه در شبکه‌های بی‌سیم مبتنی بر کدگذاری شبکه و جریان‌های چندپخشی را با هدف کاهش مصرف انرژی ارائه کردند.

۳ -مدل ریاضی ارائه شده برای اختصاص دامنه

در این تحقیق برای مدل‌سازی شبکه بی‌سیم از مدل گراف[۱۷] استفاده می‌شود. اگرچه ضعف اصلی این مدل، فرض پوشش رادیویی کاملاً منظم است. اما در شرایط واقعی احتمال دارد که پوشش رادیویی بسیار نامنظم باشد، چراکه مسائلی مانند نفوذ، ساختمان‌ها، تداخل با زیرساخت‌های موجود و غیره در این مدل لحاظ نمی‌شود. با این حال، به‌کارگیری تمام این جزئیات در مدل‌سازی شبکه، مدل را بسیار پیچیده و وابسته به سناریو می‌کند و مانع استخراج نتایج تحلیلی[۱۸] و عمومی برای تمام شبکه‌ها می‌شود. به همین دلیل و با وجود محدودیت‌های این مدل، مدل گراف به‌طور گسترده‌ای در مطالعه انواع

مختلف شبکه‌های بی‌سیم استفاده می‌شود و در این تحقیق نیز از این مدل استفاده می‌شود [۱۲،۹].

بنابراین گره‌های شبکه و الگوی ارتباط بین گره‌های بی‌سیم با گراف مدل می‌شود که به‌صورت $G=(V,E)$ نمایش داده می‌شود که در آن V مجموعه گره‌ها و E مجموعه لینک‌ها یا یال‌ها است. یک لینک ارتباطی، یالی است که از گره i شروع و به گره j ختم می‌شود و با (i,j) نمایش داده می‌شود. البته در شبکه بی‌سیم، ارتباط بین دو گره وابسته به دامنه ارسال گره فرستنده است. به‌صورت دقیق‌تر اگر دامنه ارسال گره i که با r_i نمایش داده می‌شود، از فاصله اقلیدسی گره i با j بیشتر باشد، لینک (i,j) وجود دارد و در غیر این صورت وجود نخواهد داشت. فرض می‌شود که گراف متناهی است یا به‌عبارت‌دیگر $|E|<\infty$ $|V|<\infty$ (بنابراین $|V|<\infty$).

هدف از اختصاص دامنه به دست آوردن زیرگراف فراگیر G' از گراف G است که تعداد لینک‌های آن کمتر است. استفاده از G' به‌جای استفاده از G، دارای فوایدی مانند کاهش پیچیدگی زیرلایه کنترل دسترسی به مدیا، مصرف انرژی و پیچیدگی مسیریابی است [۹]. اما از آنجائی که در مکانیزم‌های اختصاص دامنه بعضی از لینک‌ها حذف می‌شود و توپولوژی شبکه تغییر پیدا می‌کند، مسیر حرکت جریان تغییر پیدا می‌کند. لذا ارائه روش‌ها و مکانیزم‌های اختصاص دامنه در طول انجام مسیریابی باید انجام شود. در ادامه این بخش از مقاله، مدل بهینه‌سازی مسیریابی توصیف می‌شود که در مدل بهینه‌سازی اختصاص دامنه از آن استفاده می‌شود.

۳ ـ مدل بهینه‌سازی مسیریابی

مسئله کوتاه‌ترین مسیر، یک مسأله سنتی است که در آن کوتاه‌ترین مسیر بین دو گره مبدأ و مقصد در یک گراف مشخص می‌شود. به‌طور کلی مسئله انتخاب زیرگراف کوتاه‌ترین مسیر در گراف به این معنی است که فقط یال‌هایی انتخاب شوند که در برقراری مسیر بین گره مبدأ و گره مقصد، نقش داشته باشند و بقیه یال‌ها از زیرگراف حذف شوند. برای یافتن کوتاه‌ترین مسیر، روش‌های مختلفی از جمله الگوریتم‌های دایجسترا[۱۹] پیشنهاد شده است، اما مسئله کوتاه‌ترین مسیر در قالب یک برنامه‌ریزی خطی به‌صورت زیر فرموله می‌شود[۱۶]:

$$min \sum_{(i,j)} C_{(i,j)} X_{(i,j)} \qquad (۱)$$

Subject to:

$$\sum_{(i,j)\in E} X_{(i,j)} - \sum_{(j,i)\in E} X_{(j,i)} = \begin{cases} 1, & if\ i = source \\ -1, & if\ i = sink, \\ 0, & Otherwise \end{cases} \quad \forall i \in V \qquad (۲)$$

که $C_{(i,j)}$ یک پارامتر است و میزان هزینه عبور جریان از یال (i,j) را نشان می‌دهد. متغیر تصمیم این مسئله بهینه‌سازی $X_{(i,j)}$ است که بعد از حل مسئله فوق، مقداری که برای $X_{(i,j)}$ به دست می‌آید یا صفر است و یا یک. اگر $X_{(i,j)}=0$ باشد، یال (i,j) روی کوتاه‌ترین مسیر نیست و اگر یک شود یعنی یال (i,j) بر روی مسیر بین گره مبدأ و گره مقصد قرار گرفته است. بنابراین هدف آن است که مجموع هزینه‌های یال‌های انتخاب شده، حداقل شود. مسئله بهینه‌سازی فوق یک محدودیت دارد که آن محدودیت قانون بقای جریان[۲۰] گفته می‌شود. این محدودیت برای هر گره $i \in V$ بیان می‌کند که میزان جریان خروجی از گره i $(\sum_{(i,j)\in E} X_{(i,j)})$ منهای جریان‌های ورودی به آن گره $(\sum_{(j,i)\in E} X_{(j,i)})$، برای گره مبدأ $(source)$ برابر یک است، برای گره مقصد $(sink)$ منفی یک است و برای گره‌های میانی برابر صفر خواهد بود (چون گره‌های میانی نه جریانی تولید می‌کنند، نه جریانی مصرف می‌کنند). به‌عبارت‌دیگر، اگر گره i مبدأ جریان باشد، یک واحد جریان تولید می‌کند و میزان جریان خروجی منهای ورودی آن برابر یک خواهد بود، درحالی‌که اگر گره i مقصد جریان باشد، یک واحد جریان مصرف می‌کند و جریان خروجی منهای ورودی آن برابر منفی یک خواهد شد. باید دقت داشت که در این مدل فرض می‌شود که خطایی در شبکه رخ نمی‌دهد و هر گره بسته‌های دریافتی را بدون دخل و تصرف، فقط به گره بعدی ارسال می‌کند و به همین دلیل میزان جریان خروجی منهای ورودی در گره‌های میانی صفر می‌شود (برای مطالعات بیشتر به [۱۶] مراجعه فرمایید).

اما در حقیقت، در یک مسئله مسیریابی واقعی، فقط کوتاه‌ترین مسیر در گراف معادل شبکه، مد نظر نیست، بلکه در واقعیت مسئله مسیریابی با مسئله MinCost flow معادل است، زیراکه در مسیریابی همانند مسئله MinCost flow، باید ظرفیت لینک‌ها و میزان جریان تولید شده در مبدأ مد نظر قرار بگیرد. مسئله بهینه‌سازی مسیریابی در یک شبکه ارتباطی که با گراف مدل شده است، به‌صورت زیر ارائه می‌شود [۱۷،۱۶].

$$min \sum_{(i,j)} C_{(i,j)} X_{(i,j)} \qquad (۳)$$

Subject to:

$$\sum_{(i,j)\in E} X_{(i,j)} - \sum_{(j,i)\in E} X_{(j,i)} = \begin{cases} \omega, & if\ i = source \\ -\omega, & if\ i = sink, \\ 0, & Otherwise \end{cases} \quad \forall i \in V \qquad (۴)$$

$$0 \le X_{(i,j)} \le Cap_{(i,j)}, \qquad \forall (i,j) \in E \qquad (۵)$$

تابع هدف این مسئله بهینه‌سازی همانند (۱) است، ولی قیود متفاوتی آن را محدود کرده است. قید (۴) همانند محدودیت (۲) است و بیان می‌کند که اگر مجموع جریان‌های خروجی از گره i را از مجموع جریان‌های ورودی به آن گره کم شود، باید یکی از سه حالت زیر را برآورده کند، اول، اگر گره میانی باشد، برابر صفر شود، دوم، اگر گره مبدأ باشد، برابر ω یا نرخ تولید جریان باشد و سوم اگر گره مقصد باشد، برابر $-\omega$ یا نرخ مصرف جریان باشد. مشخص است که میزان جریان تولیدی و مصرفی با هم برابر هستند و عملاً ω میزان ترافیکی است که گره مبدأ ایجاد می‌کند و باید به مقصد ارسال شود. تفاوت محدودیت‌های (۲) و (۴) در این نکته است که در مدل بهینه‌سازی

(۱)-(۲) فقط برخی از یال‌ها بین فرستنده و گیرنده انتخاب می‌شوند ولی در مسئله بهینه‌سازی (۳)-(۵)، قصد آن وجود دارد که یال‌های با ظرفیت مشخصی را انتخاب کرد که این یال‌ها بتوانند ω واحد جریان تولید شده را از گره مبدأ به گره مقصد برسانند.

قید یا محدودیت (۵) نشان می‌دهد که مقدار جریان عبوری از یال‌ها باید نامنفی باشد و درعین‌حال از پارامتر $Cap_{(i,j)}$ (میزان ظرفیت یا پهنای باند لینک ارتباطی بین گره i و j) کمتر باشد.

نکته قابل‌توجه این است که بعد از حل این مسئله بهینه‌سازی، $X_{(i,j)}$ در بازه $[0,\omega]$ قرار می‌گیرد و ممکن است از بخشی از ظرفیت یک یال یا تمام ظرفیت آن استفاده کرد. اگر $X_{(i,j)}$ برابر صفر بود، یعنی یال (i,j) در مسیریابی مورد استفاده قرار نمی‌گیرد.

۲ ۳ -مسئله بهینه‌سازی ترکیب اختصاص دامنه و مسیریابی

در این بخش، مسئله ترکیب اختصاص دامنه و مسیریابی در شبکه‌های بی‌سیم به‌صورت یک مسئله بهینه‌سازی ارائه می‌گردد. متغیرها، هدف و محدودیت‌های مسئله بهینه‌سازی اختصاص دامنه و مسیریابی در ادامه طرح شده و سپس مدل بهینه‌سازی نهایی ارائه می‌شود.

متغیرهای مسئله: در مسئله‌ای که در این تحقیق عنوان شده است دو متغیر اصلی مطرح است که عبارت‌اند از:

- دامنه ارسال گره‌ها که برای هر گره i با نماد r_i نمایش داده می‌شود. این متغیر پیکربندی و ارتباط بین گره‌ها را مشخص می‌کند.
- میزان جریانی که از هر یال (i,j) عبور می‌کند و با $X_{(i,j)}$ نمایش داده می‌شود که مسیر عبور جریان را مشخص می‌کند.

هدف: در شبکه‌های بی‌سیم اهداف متنوعی مطرح می‌شود، اما کاهش توان مصرفی از مهم‌ترین آن‌هاست که در این تحقیق مدنظر قرار گرفته است. در تحقیقات مختلفی مانند [۱۳،۱۵،۱۸،۱۹] اشاره شده است که ارسال توسط یک گره بی‌سیم، انرژی قابل‌توجهی از گره را مصرف می‌کند و توان ارسال یک گره به دامنه ارسال آن رابطه دارد. با فرض اینکه $f_i(r_i)$ وابستگی بین دامنه ارسال و میزان مصرف انرژی را در گره i مشخص می‌کند، می‌توان آن را به‌عنوان هزینه پرداختی و یا وزن یال در نظر گرفت. این مصرف انرژی، به ازای هر واحد اطلاعات ارسالی توسط فرستنده یک گره مصرف می‌شود. مشخص است که برای هر گره i ممکن است، توابع متفاوتی برای ارتباط دامنه ارسال با مصرف انرژی وجود داشته باشد. بر اساس مدل مصرف انرژی که در [۹] ارائه شده است و توسط محققان مختلفی مانند [۲۰] استفاده شده است، میزان توان مصرفی برای ارسال یک بیت اطلاعات از گره i برابر با $f_i(r_i)=\eta_1+\eta_2 r_i^{\alpha}$ است که در آن α ضریب تأثیر مسیر است $(2\le\alpha\le4)$، η_2 حد آستانه توان دریافت و η_1 میزان توان مصرفی مدارات ارسال است. پارامترهای η_1، η_2 و α وابسته به گره، موقعیت آن و نوع فرستنده-گیرنده گره، متفاوت خواهد بود. اگر فرض کنیم که تمام گره‌های شبکه دارای مشخصات فیزیکی یکسانی باشند، آنگاه متغیر اصلی در تابع $f_i(r_i)$، عبارت r_i^{α} می‌باشد. با توجه به اینکه مجموع جریان‌های ارسالی توسط هر گره i برابر $\sum_{j\epsilon V}X_{(i,j)}$ است، مصرف انرژی گره i با $r_i^{\alpha}\sum_{j\epsilon V}X_{(i,j)}$ رابطه مستقیم دارد و می‌توان تابع هدف بهینه‌سازی مسیریابی را به‌صورت زیر ارائه کرد.

$$min:\sum_{i\epsilon V}\left[r_i^{\alpha}\sum_{j\epsilon V}X_{(i,j)}\right] \qquad (۶)$$

در این تابع هدف، مجموع توان مصرفی گره‌های شبکه برای ارسال اطلاعات کمینه می‌شود، اما اگر از گره‌ای جریانی عبور نکند ($X_{(i,j)}$ به ازای تمام گره‌های $j\epsilon V$ صفر باشد)، آنگاه متغیر r_i بی‌تأثیر خواهد شد. ولی در عمل وجود دامنه ارسال بالا برای گره‌های شبکه باعث مصرف انرژی خواهد شد. لذا برای کاهش دامنه در گره‌هایی که جریانی از آن‌ها عبور نمی‌کند، تابع هدف (۶) را به‌صورت زیر بازنویسی می‌کنیم.

$$min:\sum_{i\epsilon V}\left[r_i^{\alpha}+\left(r_i^{\alpha}\sum_{j\epsilon V}X_{(i,j)}\right)\right] \qquad (۷)$$

بدین ترتیب اگر از گره‌های شبکه جریانی عبور نکند، هدف حداقل‌سازی $\sum_{i\epsilon V}[r_i^{\alpha}]$ خواهد شد که باعث می‌شود مقدار حداقلی برای دامنه ارسال انتخاب شود و درنتیجه انرژی مصرفی کلی شبکه کاهش بیابد.

محدودیت دامنه ارسال: برای هر گره و وابسته به تجهیزات فیزیکی و نوع فرستنده-گیرنده آن، محدودیت دامنه ارسال وجود دارد. از یک‌طرف، دامنه ارسال هر گره باید از R_{max} کمتر باشد که R_{max} حداکثر دامنه ارسال گره است. از طرف دیگر، حداقل دامنه مشخصی نیز برای گره‌ها مطرح می‌شود، که اگر گره‌ای دامنه ارسال کمتر از R_{min} را انتخاب کند، حتی به نزدیک‌ترین همسایه خودش هم نمی‌تواند ارتباط داشته باشد. این محدودیت‌های دامنه ارسال، به‌صورت $R_{min}\le r_i\le R_{max}$ در مدل بهینه‌سازی نمایش داده می‌شود.

محدودیت قانون بقاء جریان: محدودیت قانون بقاء جریان که در بخش قبل و رابطه (۴) برای جریان‌های شبکه معرفی و توصیف شد، در این مسئله نیز مطرح می‌شود. در اصل این محدودیت، مسیری پیوسته را بین مبدأ و مقصد برای عبور جریان اجبار می‌کند.

محدودیت پهنای باند یا ظرفیت قابل دستیابی: در محدودیت (۵) از مسأله بهینه‌سازی مسیریابی اشاره شد که میزان جریان عبوری از هر یال باید از ظرفیت آن لینک کمتر باشد. اما در مسئله ترکیبی اختصاص دامنه ارسال و مسیریابی که در این تحقیق مد نظر است، اگر گیرنده خارج از دامنه ارسال فرستنده باشد، آنگاه فرستنده نمی‌تواند به آن گره داده ارسال کند. به‌عبارت‌دیگر، بین دو گره i و j دو حالت زیر ممکن است رخ دهد.

- اگر دامنه ارسال گره i، r_i، از فاصله بین دو گره، $d_{(i,j)}$، بیشتر باشد، آنگاه مقدار $X_{(i,j)}$ می‌تواند بین صفر تا $Cap_{(i,j)}$ باشد.
- اگر فاصله بین دو گره بیشتر از r_i باشد (گره j خارج از محدوده ارسال گره i باشد)، آن‌گاه $r_i-d_{(i,j)}$ کوچک‌تر از صفر می‌شود و $X_{(i,j)}$ باید صفر شود.

در این مقاله، محدودیت توصیف شده با استفاده از رابطه زیر مدل شده است.

$$0 \le X_{(i,j)} \le Cap_{(i,j)} U\left(r_i - d_{(i,j)}\right) \quad (۸)$$

که تابع $U()$ به‌صورت زیر تعریف می‌شود.

$$U(x) = \begin{cases} 1, & if\ x > 0 \\ 0, & if\ x \le 0 \end{cases} \quad (۹)$$

بدین ترتیب اگر گره j خارج از محدوده ارسال گره فرستنده i باشد و $r_i - d_{(i,j)} \le 0$، آنگاه میزان جریان عبوری بین دو گره باید صفر باشد و در غیر این صورت میزان جریان بر روی یال (i,j) باید نامنفی و کوچک‌تر از $Cap_{(i,j)}$ باشد.

مدل ریاضی نهایی مسئله: بر اساس تابع هدف و محدودیت‌هایی که اشاره شد، مدل ریاضی ترکیب مسیریابی و اختصاص دامنه به گره‌ها در یک شبکه بی‌سیم اقتضائی به‌صورت مدل ریاضی ذیل ارائه می‌شود.

$$min: \sum_{i \epsilon V} \left[r_i^{\alpha} + \left(r_i^{\alpha} \sum_{j \epsilon V} X_{(i,j)} \right) \right] \quad (۱۰)$$

Subject to:

$$\sum_{(i,j) \epsilon E} X_{(i,j)} - \sum_{(j,i) \epsilon E} X_{(j,i)} = \delta_i, \qquad \forall i \in V \quad (۱۱)$$

$$0 \le X_{(i,j)} \le Cap_{(i,j)} U(r_i - d), \qquad \forall (i,j) \in E \quad (۱۲)$$

$$R_{min} \le r_i \le R_{max}, \qquad \forall i \in V \quad (۱۳)$$

که

$$\delta_i = \begin{cases} \omega, & if\ i \text{ is a } source \\ -\omega, & if\ i \text{ is a } sink \\ 0\ , & Otherwise \end{cases} \quad (۱۴)$$

۴- الگوریتم توزیع‌شده پیشنهادی

در بخش قبل مسئله اختصاص دامنه در شبکه‌های بی‌سیم به‌صورت یک مسئله بهینه‌سازی ارائه شد. برای حل مسئله‌ای که در بخش قبل ارائه شد، نیاز است که تمام اطلاعات موقعیتی مربوط به گره‌ها در یک گره جمع‌آوری شود و سپس مسئله را حل کرد. به‌عبارت‌دیگر، مسئله بهینه‌سازی (۱۰)-(۱۴) به‌صورت متمرکز حل می‌شود و نیاز است که فاصله بین گره‌ها و مقدار جریان تولیدی توسط گره‌ها (δ_i) در گرهی که مسئله را حل می‌کند، جمع‌آوری شود. اما استفاده از این مدل بهینه‌سازی در شبکه‌های بی‌سیم بزرگ، به دو دلیل اصلی غیرعملی و غیرممکن است[۲۱]. دلیل اول این موضوع، آن است که در شبکه‌های بزرگ که تعداد زیادی گره دارند، تعداد زیادی متغیر مطرح می‌شود و حل متمرکز آن، نیاز به حافظه بزرگ در گره مرکزی و صرف زمان برای به دست آوردن راه‌حل خواهد داشت. دلیل دوم آن است که میزان جریان تولید شده توسط هر گره i از شبکه (δ_i)، وابسته به کاربرد شبکه متغیر است و معمولاً قابل پیش‌بینی نیست. درنتیجه برای استفاده از این مدل بهینه‌سازی لازم است که در هر لحظه میزان جریان تولیدی و مصرفی گره‌ها به یک گره مرکزی گزارش شود و آن گره بر اساس اطلاعات جمع‌آوری شده، مسئله بهینه‌سازی را حل کرده و نتایج را برای گره‌های شبکه ارسال کند. بنابراین لازم است که الگوریتمی طراحی شود که هر گره بتواند بر اساس اطلاعات محلی خود (اطلاعات میزان جریان تولید شده توسط گره و همسایه‌های آن و همچنین فاصله تا گره‌های همسایه) و بدون نیاز به اطلاعات کل شبکه، تصمیم‌گیری در مورد مقدار متغیرهایش را انجام بدهد.

الگوریتم‌ها و روش‌های مختلفی برای حل مسائل بهینه‌سازی به‌صورت توزیع‌شده وجود دارد که برخی از آن‌ها مانند روش‌های عددی، در [۲۲] معرفی شده‌اند. روش‌های عددی برای حل مسائل بهینه‌سازی، نیاز به یک حدس اولیه دارند و سپس این حدس را با تکرارهای متوالی و مداوم بهبود می‌دهند تا به اندازه کافی به جواب مسئله نزدیک شوند. از بین الگوریتم‌های مختلف توزیع‌شده، در این مقاله از ترکیب روش‌های تفکیک و زیرگرادیان استفاده شده است که قبلاً نیز برای مسائل مشابه مانند [۲۶-۲۳] استفاده شده است. الگوریتم پیشنهادی توزیع‌شده و گسسته است که به‌وسیله رد و بدل کردن بسته‌هایی بین گره‌ها انجام می‌شود و هر گره i بر اساس اطلاعات محلی خود یک تصمیم‌گیری برای متغیرهای r_i و $X_{(i,j)}$ انجام می‌دهد. در ادامه مراحل به دست آمدن الگوریتم پیشنهادی توصیف شده است.

۴-۱- ایجاد تابع لاگرانژین

به‌منظور حل مسئله (۱۰)-(۱۴)، تابع هدف و محدودیت‌های آن، در یک تابع لاگرانژ[۲۱] قرار داده می‌شود که برابر است با

$$\begin{aligned} L(r,x,\beta,\theta) &= \sum_{i \epsilon V} \left[r_i^{\alpha} + r_i^{\alpha} \sum_{j \epsilon V} X_{(i,j)} \right] \\ &- \sum_{i \epsilon V} \beta_i \left[\sum_{(i,j) \epsilon E} X_{(i,j)} - \sum_{(j,i) \epsilon E} X_{(j,i)} - \delta_i \right] \\ &+ \sum_{i \epsilon V} \sum_{j \epsilon V} \theta_{(i,j)} \left[X_{(i,j)} - Cap_{(i,j)} U(r_i - d_{(i,j)}) \right] \end{aligned} \quad (۱۵)$$

که β_i و $\theta_{(i,j)}$، به ترتیب ضرایب لاگرانژ مربوط به محدودیت‌های بقاء جریان (۱۱) و ظرفیت لینک (۱۲) هستند. البته محدودیت (۱۳) در این لاگرانژین نادیده گرفته شده است که در طراحی الگوریتم اعمال خواهد شد. با کمک این تابع لاگرانژین، می‌توان مدل دوگان مسئله بهینه‌سازی و شرایط کاروش-کان-تاکر یا KKT[۲۲] را به‌صورت چند معادله و چند مجهول برای حل مدل ارائه داد. اما در حل توزیع‌شده مسئله به ما کمک نمی‌کنند، بنابراین از ارائه مدل بهینه‌سازی دوگان در این بخش خودداری شده است. برای اطلاع از خصوصیات و جوانب تابع لاگرانژ به [۲۲] مراجعه فرمائید.

۴ ۲ -تفکیک تابع لاگرانژین

با استفاده از تکنیک تفکیک، مسئله اصلی به چند زیر مسئله تقسیم می‌شود. زیر مسئله‌ها از یکدیگر مستقل هستند، اما نیاز است که با هم هماهنگ حل شوند تا به راه‌حل مسئله اصلی همگرا شوند. این هماهنگی با ارسال پیام‌هایی بین گره‌ها امکان‌پذیر خواهد شد. برای استفاده از این تکنیک، تابع لاگرانژین (۱۵) به‌صورت زیر بازنویسی می‌شود.

$$\begin{aligned} &L(r,x,\beta,\theta) \\ &= \sum_{i\epsilon V}\left[r_i^{\alpha} + r_i^{\alpha}\sum_{j\epsilon V} X_{(i,j)}\right] + \sum_{i\epsilon V}\delta_i\beta_i \\ &+ \sum_{i\epsilon V}\sum_{j\epsilon V}\left[X_{(i,j)}(\theta_{(i,j)} + \beta_j - \beta_i)\right] \\ &- \sum_{i\epsilon V}\sum_{j\epsilon V}\theta_{(i,j)}\left[Cap_{(i,j)} \times U(r_i - d_{(i,j)})\right] \end{aligned} \quad (۱۶)$$

که تفکیک‌پذیر و مجموعی از چند تابع لاگرانژین است. به‌عبارت‌دیگر، اگر تابع لاگرانژین هر گره i به‌صورت زیر نوشته شود،

$$\begin{aligned} &L_i(r,x,\beta,\theta)_i \\ &= r_i^{\alpha} + \beta_i\delta_i + \sum_{j\epsilon V}\left[X_{(i,j)}\left(r_i^{\alpha} + \beta_j - \beta_i + \theta_{(i,j)}\right)\right] \\ &- \sum_{j\epsilon V}\theta_{(i,j)}\left[Cap_{(i,j)} \times U(r_i - d_{(i,j)})\right] \end{aligned} \quad (۱۷)$$

آنگاه مجموع توابع لاگرانژین گره‌ها، برابر تابع لاگرانژین (۱۶) می‌شود و

$$L(r,x,\beta,\theta) = \sum_{i\epsilon V} L_i(r,x,\beta,\theta)_i \quad (۱۸)$$

۴ ۳ -مروری بر روش زیرگرادیان

در این بخش مروری بر روش زیرگرادیان می‌شود که در بخش بعد، با کمک آن الگوریتمی برای حل مسئله به‌صورت توزیع‌شده ارائه شود.

الگوریتم زیرگرادیان، مشابه الگوریتم‌های بر پایه گرادیان[۲۳] است و برای حداقل‌سازی توابع مشتق‌ناپذیر استفاده می‌شود با این تفاوت که در آن، مقدار تابع هدف همیشه کاهش پیدا نمی‌کند و ممکن است، افزایش بیابد. سادگی و قابلیت کاربرد عمومی روش زیرگرادیان باعث شده است که در میان الگوریتم‌های حل مسائل بهینه‌سازی غیرخطی نقش مهمی داشته باشد. البته روش‌های دیگری نیز برای حل این مسائل مطرح است، اما روش زیرگرادیان محاسبات ساده‌تری دارد و برای گره‌های بی‌سیم که توان محاسباتی کمی دارند، مناسب‌تر است. روش زیرگرادیان به‌طور کامل در [۲۸،۲۷] توصیف شده است و در ادامه به‌صورت خلاصه معرفی می‌شود.

در روش زیرگرادیان، یک عدد اولیه، $y[1]$، در نظر گرفته می‌شود و در هر مرحله مقدار $y[n]$ به‌روز می‌شود. به‌صورت دقیق‌تر در هر مرحله، مقدار قبلی به‌دست‌آمده $y[n]$، اندازه مرحله $\lambda[n]$ و جهت کاهش (به زیردیفرانسیل تابع لاگرانژین در نقطه $y[n]$ متعلق است و با $\xi[n]$ نشان داده می‌شود)، به کار گرفته می‌شوند و با استفاده از رابطه زیر نقطه جدید $\bar{y}[n+1]$ به دست می‌آید.

$$\bar{y}[n+1] = y[n] - \lambda[n]\xi[n] \quad (۱۹)$$

باید توجه داشت که نقطه $y[n]$، در ناحیه شدنی مسئله، Y، قرار دارد، اما نیازی نیست $\bar{y}[n+1]$ به Y متعلق باشد. نقطه $y[n+1]$ با استفاده از نگاشت $\bar{y}[n+1]$ به ناحیه شدنی Y به دست می‌آید. به‌عبارت‌دیگر، نزدیک‌ترین نقطه به $\bar{y}[n+1]$ در ناحیه شدنی Y در $y[n+1]$ قرار می‌گیرد که به‌صورت زیر نمایش داده می‌شود.

$$y[n+1] = \text{argmin}\{\|y - \bar{y}[n+1]\| : y \in Y\} \quad (۲۰)$$

خروجی تابع نرم $\|\ \|$، یک عدد حقیقی مثبت است و در رابطه فوق، نقطه‌ای از ناحیه شدنی که کمترین فاصله با $\bar{y}[n+1]$ را دارد، در $y[n+1]$ قرار داده می‌شود.

بنابراین در هر مرحله از روش زیرگرادیان، در جهت منفی زیردیفرانسیل، مقدار تابع کاهش داده می‌شود. ولی از آنجائی که مقدار $\bar{y}[n+1]$ ممکن است متعلق به ناحیه شدنی Y نباشد، نزدیک‌ترین نقطه به $\bar{y}[n+1]$ به‌عنوان $y[n+1]$ در نظر گرفته می‌شود. به این دلیل ممکن است در بعضی مراحل مقدار تابع هدف کاهش پیدا نکند.

از آنجائی که روش زیرگرادیان همیشه کاهشی نیست و ممکن است در برخی مراحل افزایش بیابد، بنابراین مقدار بهترین نتیجه در متغیر $\vec{y}$ نگهداری می‌شود و مقدار متناظر تابع لاگرانژین به ازای آن مقدار، در UB نگهداری می‌شود. به‌عبارت‌دیگر، اگر در مرحله ام $y[n]$ بهترین نتیجه را داشته باشد آن در متغیر $\vec{y}$ ذخیره کرده و مقدار متناظر تابع در این نقطه در UB ذخیره می‌شود، در غیر این صورت، متغیرهای $\vec{y}$ و UB تغییر داده نمی‌شوند. بدین ترتیب همیشه در متغیر $\vec{y}$ بهترین جواب به‌دست‌آمده از اجرا، نگهداری می‌شود و UB مقدار تابع لاگرانژین متناظر با آن نقطه را نگهداری می‌کند.

۴ ۴ -حل مسئله با روش زیرگرادیان

روش زیرگرادیان یک الگوریتم مرحله‌ای و تکرارشونده است که مقدار محاسبه شده برای متغیرهای $X_{(i,j)}$، r_i، β_i و $\theta_{(i,j)}$ در مرحله n به ترتیب با $X_{(i,j)}[n]$، $r_i[n]$، $\beta_i[n]$ و $\theta_{(i,j)}[n]$ نمایش داده می‌شود. در این روش، مقادیر اولیه‌ای برای متغیرها در نظر گرفته می‌شود، سپس با استفاده از روابطی، مقادیر $X_{(i,j)}[n+1]$، $r_i[n+1]$ و $\beta_i[n+1]$ و $\theta_{(i,j)}[n+1]$ محاسبه می‌شود.

برای محاسبه روابط لازم برای متغیرهای اصلی و دوگان مسئله با روش تفکیک، دو گام اساسی مطرح می‌شود. در گام اول، با ثابت فرض کردن متغیرهای اصلی ($X_{(i,j)}[n]$ و $r_i[n]$)، مقدار جدیدی برای متغیرهای لاگرانژین مسئله ($\beta_i[n+1]$ و $\theta_{(i,j)}[n+1]$)، با روش زیرگرادیان محاسبه می‌شود. سپس در گام دوم، مقادیر جدیدی برای متغیرهای اصلی $X_{(i,j)}[n+1]$ و $r_i[n+1]$ با ثابت فرض کردن متغیرهای دوگان ($\beta_i[n]$ و $\theta_{(i,j)}[n]$) به دست می‌آید. در ادامه این دو گام به تفسیر توصیف شده‌اند.

در گام اول، هر گره i مقادیر $\beta_i[n+1]$ و $\theta_{(i,j)}[n+1]$ را با استفاده از روش زیرگرادیان محاسبه می‌کند. جهت‌های کاهش برای این دو متغیر به ترتیب با $\xi_i^{\beta}[n]$ و $\xi_{(i,j)}^{\theta}[n]$ نمایش داده می‌شوند که به ترتیب زیردیفرانسیل[۲۴] تابع لاگرانژین $L_i(r,x,\beta,\theta)_i$ نسبت به متغیرهای β_i و $\theta_{(i,j)}$ هستند.

$$\xi_i^{\beta}[n] = \frac{\partial L_i(r,x,\beta,\theta)_i}{\partial \beta_i} = \sum_{(i,j)\epsilon E} X_{(i,j)}[n] - \sum_{(j,i)\epsilon E} X_{(j,i)}[n] - \delta_i \quad (۲۱)$$

$$\xi_{(i,j)}^{\theta}[n] = \frac{\partial L_i(r,x,\beta,\theta)_i}{\partial \theta_{(i,j)}} = \left[X_{(i,j)}[n] - Cap_{(i,j)} \times U(r_i[n] - d_{(i,j)})\right] \quad (۲۲)$$

بنابراین گره i می‌تواند با انتخاب اندازه مرحله مناسب برای این دو متغیر (با $\lambda_\beta[n]$ و $\lambda_\theta[n]$ نمایش داده می‌شوند) و در نظر گرفتن مقادیر اولیه‌ای برای $\beta_i[1]$ و $\theta_{(i,j)}[1]$، محاسبه مقادیر $\beta_i[n+1]$ و $\theta_{(i,j)}[n+1]$ را با استفاده از روابط زیر انجام می‌شود.

$$\beta_i[n+1] = \left(\beta_i[n] + \lambda_\beta[n]\xi_i^{\beta}[n]\right)^+ \quad (۲۳)$$

$$\theta_{(i,j)}[n+1] = \left(\theta_{(i,j)}[n] + \lambda_\theta[n]\xi_{(i,j)}^{\theta}[n]\right)^+ \quad (۲۴)$$

از آنجائی که متغیرهای $\beta_i[n]$ و $\theta_{(i,j)}[n]$ نامنفی هستند، تابع نگاشت به‌صورت زیر تعریف می‌شود.

$$(\varphi)^+ = \begin{cases} \varphi & if\ \varphi > 0 \\ 0 & if\ \varphi \le 0 \end{cases} \quad (۲۵)$$

در گام دوم، مقادیر دو متغیر $X_{(i,j)}[n+1]$ و $r_i[n+1]$ با ثابت در نظر گرفتن $\beta_i[n]$ و $\theta_{(i,j)}[n]$ محاسبه می‌شود. البته این دو متغیر به‌صورت جداگانه در نظر گرفته می‌شوند و جداگانه برای هرکدام روابطی ارائه می‌گردد.

زمانی که $X_{(i,j)}$، در تابع لاگرانژ $L_i(r,x,\beta,\theta)_i$، متغیر در نظر گرفته می‌شود، فقط عبارت

$$\sum_{j\epsilon V}\left[X_{(i,j)}\left(r_i[n]^{\alpha} + \beta_j[n] - \beta_i[n] + \theta_{(i,j)}[n]\right)\right] \quad (۲۶)$$

به متغیر $X_{(i,j)}$ وابسته خواهد بود. بنابراین برای حداقل‌سازی تابع لاگرانژ، مقدار $X_{(i,j)}[n+1]$ با استفاده از رابطه زیر محاسبه می‌شود.

$$X_{(i,j)}[n+1] = \underset{0\le z}{\operatorname{argmin}}\{zCost_{(i,j)}[n]\} \quad (۲۷)$$

که

$$Cost_{(i,j)}[n] = \left(r_i[n]^{\alpha} + \beta_j[n] - \beta_i[n] + \theta_{(i,j)}[n]\right) \quad (۲۸)$$

و z متغیر تصمیم است که اگر $Cost_{(i,j)}[n] > 0$ باشد، آنگاه $z = 0$ و اگر $Cost_{(i,j)}[n]$ منفی شود، مقدار جریان اضافه‌ای که در گره وجود دارد باید ارسال شود و $z = \xi_i^{\beta}[n]$. به‌عبارت‌دیگر

$$X_{(i,j)}[n+1] = \begin{cases} 0, & if\ \left(Cost_{(i,j)}[n] \ge 0\right) \\ \xi_i^{\beta}[n], & Otherwise \end{cases} \quad (۲۹)$$

در ادامه این گام، مقادیر $X_{(i,j)}[n]$، $\beta_i[n]$ و $\theta_{(i,j)}[n]$ ثابت در نظر گرفته می‌شوند و $r_i[n+1]$ محاسبه می‌شود. اگر در تابع لاگرانژین $L_i(r,x,\beta,\theta)_i$، متغیرهای $X_{(i,j)}$، β_i و $\theta_{(i,j)}$ ثابت فرض شوند، آنگاه حداقل‌سازی تابع لاگرانژین با حداقل‌سازی عبارت زیر معادل است.

$$r_i^{\alpha}\left(1 + \sum_{j\epsilon V} X_{(i,j)}\right) - \sum_{j\epsilon V}\theta_{(i,j)}\left[Cap_{(i,j)} \times U(r_i - d_{(i,j)})\right] \quad (۳۰)$$

که در آن r_i متغیر است و باید در بازه $[R_{min}, R_{max}]$ قرار بگیرد. بنابراین محاسبه مقدار $r_i[n+1]$ با استفاده از رابطه زیر انجام می‌شود.

$$r_i[n+1] = \underset{R_{min}\le w\le R_{max}}{\operatorname{argmin}}\left\{w^{\alpha}\left(1 + \sum_{j\epsilon V} X_{(i,j)}[n]\right) - \sum_{j\epsilon V}\left[\theta_{(i,j)}[n]Cap_{(i,j)}U(w - d_{(i,j)})\right]\right\} \quad (۳۱)$$

که در آن w متغیر تصمیم است. با توجه به اینکه $X_{(i,j)}[n]$، $\theta_{(i,j)}[n]$، $Cap_{(i,j)}$ و $d_{(i,j)}$ اعداد ثابت هستند، این مسئله بهینه‌سازی غیرخطی را می‌توان با الگوریتم‌ها یا ابزارهای مختلفی حل نمود و مقدار بهینه w محاسبه شده را در $r_i[n+1]$ قرار داد. دقت شود که argmin به معنای یافتن آرگومانی است که رابطه فوق را حداقل‌سازی کند و از آنجائی که این مسئله یک متغیر دارد، می‌تواند توسط هر گره حل شود.

۴ ۵ ـ خلاصه الگوریتم پیشنهادی

در بخش قبل، روابطی برای به دست آوردن متغیرها مسئله ارائه شد که به‌صورت تکرار شونده است و مقدارهایی را برای متغیرها تولید می‌کند.

در الگوریتم پیشنهادی، هر گره، مقدار $X_{(i,j)}[n]$، $r_i[n]$، $\beta_i[n]$ و $\theta_{(i,j)}[n]$ را نگهداری می‌کند و با استفاده از بسته‌هایی که با همسایگانش رد و بدل می‌کند، از مقدار این متغیرها در گره‌های همسایه مطلع می‌شود. در نهایت هر گره با استفاده از روابط ارائه شده، متغیرها را به‌روز می‌کند. همان‌طورکه گفته شد، روش زیرگرادیان همیشه کاهشی نیست و ممکن است در برخی مراحل افزایش بیابد، بنابراین مقدار بهترین نتیجه متغیرها در $\overrightarrow{r_i}$، $\overrightarrow{\beta_i}$، $\overrightarrow{\theta_{(i,j)}}$ و $\overrightarrow{X_{(i,j)}}$ نگهداری می‌شود و مقدار متناظر تابع لاگرانژین به ازای آن مقادیر، در UB_i ذخیره می‌شود. مقدار تابع لاگرانژین در مرحله nام با استفاده از رابطه زیر محاسبه می‌شود.

$$L_i[n] = r_i[n]^{\alpha} + \beta_i[n]\delta_i + \sum_{j\epsilon V}\big[X_{(i,j)}[n]\big(r_i[n]^{\alpha} + \beta_j[n] - \beta_i[n] + \theta_{(i,j)}[n]\big)\big] - \sum_{j\epsilon V}\theta_{(i,j)}[n]\left[Cap_{(i,j)} \times U(r_i[n] - d_{(i,j)})\right] \quad (۳۲)$$

شبه‌کد الگوریتم پیشنهادی که اختصاص دامنه و مسیریابی را انجام می‌دهد، در شکل ۱ نشان داده شده است. لازم است که هر گره i این الگوریتم را به‌صورت هم‌زمان با دیگر گره‌ها اجرا کند.

در ابتدای این الگوریتم (شش خط ابتدایی شبه‌کد)، یک نقطه اولیه انتخاب می‌شود (این نقطه اولیه به‌عنوان نقطه بهینه اولیه نیز در نظر گرفته می‌شود) و حد بالای تابع لاگرانژین، UB_i، برای این نقطه محاسبه می‌شود. در ادامه و بعد از محاسبه مقادیر $\xi_i^{\beta}[n]$ و $\xi_{(i,j)}^{\theta}[n]$ وارد یک حلقه می‌شود و تا زمانی که $\xi_i^{\beta}[n] = 0$ و $\xi_{(i,j)}^{\theta}[n] = 0$ شوند، دستورات داخل حلقه اجرا می‌شوند. البته معیارهای دیگری مانند معیار Armijo در [۲۸] برای خاتمه الگوریتم‌های تکرار شونده مطرح شده‌اند که به علت پیچیدگی پیاده‌سازی آن‌ها در گره‌های بی‌سیم، از ارائه آن‌ها صرف‌نظر شد. در ابتدای حلقه (خط ۹ شبه‌کد)، هر گره مقدار متغیرهای خود را به تمام لینک‌های خروجی خود ارسال می‌کند و سپس اندازه مرحله مناسب را انتخاب می‌کند (در بخش پنجم از مقاله، شبیه‌سازی‌هایی برای ارزیابی انتخاب اندازه مرحله متغیر ارائه شده است). در ادامه اجرای الگوریتم (خطوط ۱۰ تا ۱۳ از شبه‌کد)، مقادیر متغیرها با استفاده از روابط ارائه شده به‌روز می‌شوند. سپس اگر $L_i[n+1] < UB_i$ باشد، راه‌حل بهتری پیدا شده است که در متغیرهای در $\vec{r_i}$، $\vec{\beta_i}$، $\overrightarrow{\theta_{(i,j)}}$ و $\overrightarrow{X_{(i,j)}}$ ذخیره می‌شود و در غیر این صورت تغییر نمی‌کنند. در انتها و قبل از بازگشت به ابتدای حلقه، لازم است که مقدار n یک واحد افزایش یابد و مقادیر جدید $\xi_i^{\beta}[n]$ و $\xi_{(i,j)}^{\theta}[n]$ محاسبه شود.

1: $n = 1$
2: $\vec{r_i} = r_i[n] = R_{min}$
3: $\vec{\beta_i} = \beta_i[n] = 0$
4: $\overrightarrow{\theta_{(i,j)}} = \theta_{(i,j)}[n] = 0$
5: $\overrightarrow{X_{(i,j)}} = X_{(i,j)}[n] = 0$
6: $UB_i = L_i[n]$ by utilizing (32)
7: Compute $\xi_i^{\beta}[n]$ and $\xi_{(i,j)}^{\theta}[n]$ by utilizing (21) and (22)
8: While not ($\xi_i^{\beta}[n] = 0$ and $\xi_{(i,j)}^{\theta}[n] = 0$)
9: Send the variables to the neighbors
10: Compute $\lambda_{\beta}[n]$ and $\lambda_{\theta}[n]$
11: Compute $X_{(i,j)}[n+1]$ by evaluating (29)
12: Compute $r_i[n+1]$ by evaluating (31)
13: Compute $\beta_i[n+1]$ and $\theta_{(i,j)}[n+1]$ by evaluating (23) and (24) respectively
14: If $L_i[n+1] < UB_i$
15: $UB = L_i[n+1]$
16: $\vec{r_i} = r_i[n]$
17: $\vec{\beta_i} = \beta_i[n]$
18: $\overrightarrow{\theta_{(i,j)}} = \theta_{(i,j)}[n]$
19: $\overrightarrow{X_{(i,j)}} = X_{(i,j)}[n]$
20: $n = n + 1$
21: Compute $\xi_i^{\beta}[n]$ and $\xi_{(i,j)}^{\theta}[n]$ by utilizing (21) and (22) respectively

شکل ۱: شبه‌کد الگوریتم پیشنهادی

۵ -ارزیابی کارایی

در این مقاله دو مکانیزم برای ترکیب اختصاص دامنه و مسیریابی در شبکه‌های اقتضایی بی‌سیم پیشنهاد شد. در این بخش، مکانیزم‌های پیشنهادی مورد ارزیابی قرار می‌گیرند و با روش‌های موجود مقایسه می‌شوند. به‌صورت دقیق‌تر در این بخش، مکانیزم‌های زیر با یکدیگر مقایسه شده‌اند.

- مسئله بهینه‌سازی ترکیب اختصاص دامنه و مسیریابی در شبکه‌های بی‌سیم اقتضائی که با روابط (۱۰)-(۱۴) مدل شده است. در ادامه نتایج این راه‌حل ORA[۲۵] نامیده می‌شود.
- الگوریتم توزیع‌شده پیشنهادی که شبه‌کد آن در شکل ۱ نشان داده شده است و در ادامه DRA[۲۶] نامیده می‌شود.
- الگوریتم اختصاص دامنه گراف گابریل یا GG که در بخش دوم مقاله توضیح داده شد و به‌صورت کامل در [۹] توصیف شده است.
- الگوریتم MaxTR که در آن اختصاص دامنه انجام نمی‌شود و گره‌های شبکه از حداکثر دامنه ارسال استفاده می‌کنند.

بعد از تعیین دامنه ارسال و ایجاد توپولوژی توسط GG و MaxTR، مسیریابی با کمترین توان مصرفی با حل مدل بهینه‌سازی (۳)-(۵) برای آن‌ها انجام می‌شود. البته راه‌حل دیگری نیز توسط خلیلی-درمنی و همکاران در [۱۵،۱۰] با نام OToNec ارائه شده است که اختصاص دامنه ارسال را با وجود جریان‌های چندپخشی مدل می‌کند. مقایسه‌هایی با در نظر گرفتن یک گیرنده (تک‌پخشی) با مدل OToNec انجام شد که نتایج تقریباً یکسانی با ORA به دست آمد و تفاوت قابل ذکری بین نتایج دو مدل دیده نشد.

در ادامه این بخش، ابتدا محیط شبیه‌سازی و مقداردهی‌های اولیه برای پارامترها توصیف می‌شود، البته در بخش ۵-۱ توصیف آزمایشات تعیین پارامتر اندازه مرحله، نیز ارائه شده است. سپس، بر اساس معیارهای تأخیر انتها به انتها[۲۷] (بخش ۵-۲)، انرژی مصرفی (بخش ۵-۳) و قابلیت اطمینان (بخش ۵-۴)، مکانیزم‌های GG، MaxTR، ORA و DRA با یکدیگر مقایسه می‌شوند.

۵ ـ۱ محیط و پارامترهای شبیه‌سازی

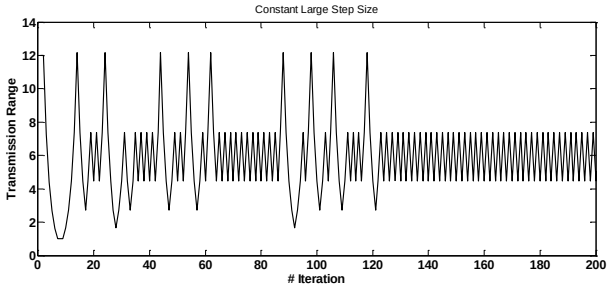
در این مقاله، برای انجام شبیه‌سازی‌ها از زبان مدل‌سازی AMPL و زبان برنامه‌نویسی پایتون استفاده شده است. به‌صورت دقیق‌تر، مسئله بهینه‌سازی ORA توسط زبان مدل‌سازی AMPL مدل و توسط BONMIN (به روش گرادیان کاهش یافته مسائل غیرخطی را حل می‌کند) حل گردید. پیاده‌سازی الگوریتم DRA نیز با استفاده از زبان برنامه‌نویسی پایتون ۲,۷ انجام شد و برای حل رابطه (۳۱) از الگوریتم DRA از بسته PuLP استفاده شد. مکانیزم‌های GG و MaxTR نیز با زبان برنامه‌نویسی پایتون پیاده‌سازی شدند. پارامترهای شبیه‌سازی همانند [۲۹،۱۵،۱۰]، مطابق جدول ۱ است.

جدول ۱: مقداردهی‌های اولیه برای شبیه‌سازی

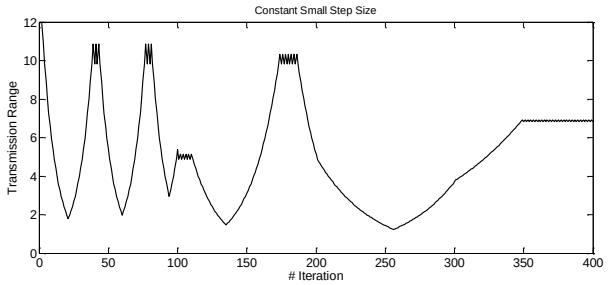
پارامتر	مقدار
Packet size	
Queue size	10 packet

در تمام شبیه‌سازی‌ها، شبکه‌ای با ۴۰ گره با انرژی اولیه هفت ژول در نظر گرفته شد که گره‌ها به‌صورت تصادفی در ناحیه‌ای به ابعاد 50×50 متر مربع قرار گرفته‌اند. البته به دلیل قرارگیری تصادفی گره‌ها، تمام آزمایشات ۴۰ بار تکرار شد و میانگین نتایج به‌دست‌آمده به‌عنوان نتیجه نهایی گزارش گردید. گره مبدأ به‌صورت تصادفی از بین گره‌ها انتخاب می‌شود که هر PI[۲۸] ثانیه، بسته‌ای ۲۵۶ بیتی را به مقصد یک گره تصادفی ارسال می‌کند. همچنین فرض شده است که گره‌ها هم‌زمان شده‌اند و دسترسی به رسانه TDMA[۲۹] استفاده می‌شود.

از آنجائی که همگرایی الگوریتم DRA، به انتخاب اندازه مرحله وابسته است، آزمایشاتی برای تعیین اندازه مرحله مناسب انجام شد. به‌طور کلی سه روش برای انتخاب اندازه مرحله مطرح است که اندازه مرحله بهینه، ثابت و کاهشی می‌باشند. در انتخاب اندازه مرحله بهینه، الگوریتم سریع و دقیق به نقطه بهینه نزدیک می‌شود. ولی به دست آوردن این اندازه مرحله مستلزم آن است که راه‌حل بهینه مشخص باشد که در بیشتر مسائل بهینه‌سازی و مسئله‌ای که در این تحقیق مطرح است، غیرممکن است. اما در اندازه مرحله ثابت، یک عدد ثابت به‌عنوان $\lambda[n]$ انتخاب می‌شود. شکل ۲ اثر انتخاب اندازه مرحله بزرگ و ثابت در تکرارهای متوالی را نشان می‌دهد، واضح است که الگوریتم بعد از ۱۲۰ تکرار به نزدیکی راه‌حل بهینه می‌رسد، ولی در نزدیکی راه‌حل بهینه زیگزاگ رخ می‌دهد. در شکل ۳، نتیجه تکرار آزمایش با اندازه مرحله کوچک و ثابت نشان داده شده است، در این حالت، زیگزاگ کمتری در نزدیکی راه‌حل بهینه رخ می‌دهد، ولی همگرایی الگوریتم کاهش می‌یابد و الگوریتم DRA بعد از ۳۶۰ بار تکرار به راه‌حل بهینه همگرا می‌شود. واضح است که انتخاب اندازه مرحله ثابت و متوسط منجر به آن می‌شود که سرعت همگرایی متوسطی داشته باشیم و زیگزاگ متوسطی در نزدیکی راه‌حل بهینه رخ بدهد.

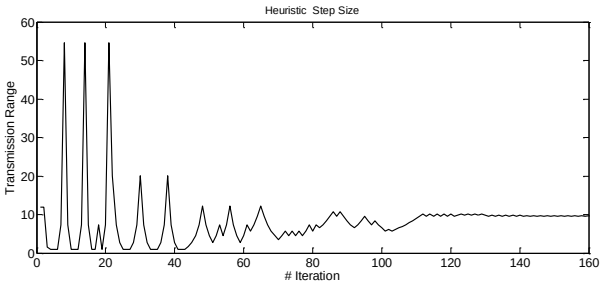


شکل ۲: تغییر دامنه ارسال گره با اندازه مرحله بزرگ



شکل ۳: تغییر دامنه ارسال گره با اندازه مرحله کوچک

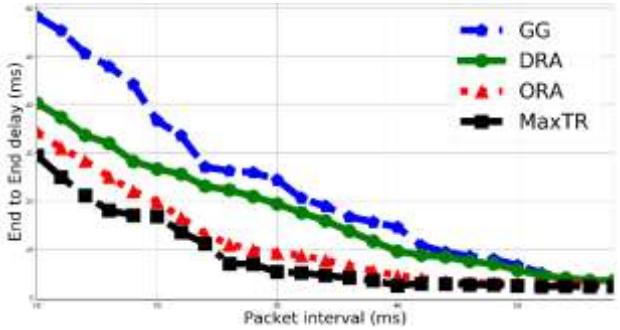
بعد از آزمایش اولیه مشخص شد که اندازه مرحله ثابت برای الگوریتم DRA مناسب نیست، لذا در آزمایش بعدی اندازه مرحله متغیر مورد بررسی قرار گرفت که ابتدا مقدار متوسطی دارد و به‌تدریج با نزدیک شدن به جواب بهینه مسئله کاهش پیدا می‌کند. اثبات شده است که اگر اندازه مرحله $\lambda[n]$ دارای شرایط $\lambda[n] > 0$، $lim_{n\to\infty} \lambda[n]^2 = 0$ و $\sum_{n=1}^{\infty} \lambda[n] = \infty$ باشد الگوریتم یا به نقطه بهینه ختم می‌شود و یا بعد از تعداد محدودی مرحله به راه‌حل بهینه نزدیک خواهد شد[۲۷]. $\sum_{n=1}^{\infty} \lambda[n] = \infty$ تضمین می‌کند که مقدار $\lambda[n]$ خیلی سریع کاهش پیدا نکند و تعداد تکرار کم نباشد. شرط $lim_{n\to\infty} \lambda[n]^2 = 0$ تضمین می‌کند که هر چه تعداد تکرار افزایش یابد، مقدار اندازه مرحله کم شود. نتیجه آزمایش برای اندازه مرحله متغیر در شکل ۴ نشان داده شده است که بعد از ۱۲۰ مرحله به راه‌حل بهینه همگرا می‌شود. واضح است که با وجود آهنگ همگرایی مناسب، در نزدیکی راه‌حل بهینه زیگزاگ رخ نمی‌دهد. لذا در شبیه‌سازی‌های بعدی از این نوع اندازه مرحله استفاده شد.



شکل ۴: تغییر دامنه ارسال گره با اندازه مرحله پویای کاهشی

۵ ۲ -تأخیر انتها به انتها

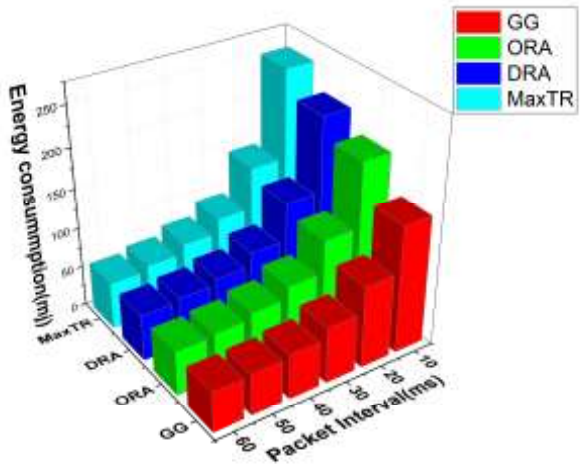
یکی از معیارهای مهم برای ارزیابی کارآیی الگوریتم‌ها در شبکه‌های ارتباطی، تأخیر انتها به انتها می‌باشد که مدت زمان سپری شده از ارسال بسته‌ها توسط گره فرستنده تا دریافت آن توسط گره گیرنده را تعریف می‌کند. میزان متوسط تأخیر انتها به انتهای ارسال بسته‌ها با تغییر PI، در شکل ۵ نشان داده شده است. واضح است که با افزایش PI بسته‌های کمتری تولید می‌شود و متوسط تأخیر انتها به انتها کاهش می‌یابد. نتایج این آزمایش نشان می‌دهد که GG بیشترین تأخیر را دارد و کمترین تأخیر مربوط به MaxTR می‌باشد. تأخیر کمتر MaxTR به دلیل تعداد گام‌های کمتری است که در شبکه بین گره فرستنده و گیرنده قرار می‌گیرد. اما بیشترین تأخیر مربوط به مکانیزم GG است که بدون در نظر گرفتن مسیر بین فرستنده و گیرنده، اختصاص دامنه را انجام می‌دهد. تأخیر ORA کمتر از الگوریتم DRA است، زیرا DRA به تعدادی مرحله برای ایجاد همگرایی و رسیدن به پاسخ بهینه نیاز دارد، لذا در مراحل ابتدایی تأخیر انتها به انتهای بیشتری دارد که افزایش متوسط تأخیر انتها به انتها را نتیجه می‌دهد. البته اگر تأخیر جمع‌آوری اطلاعات، پردازش اطلاعات و ایجاد توپولوژی در مکانیزم ORA مد نظر قرار داده شود، الگوریتم DRA تأخیر کمتری خواهد داشت.



شکل ۵: مقایسه تأخیر انتها به انتها

۵ ۳ -انرژی مصرفی

گره‌ها در شبکه‌های بی‌سیم با باطری کار می‌کنند و انرژی مصرفی یکی از معیارهای مهم در ارزیابی کارآیی این شبکه‌ها می‌باشد. مجموع انرژی مصرفی گره‌ها با تغییر فاصله بین تولید بسته‌ها (PI)، در شکل ۶ نشان داده شده است. در تمام مکانیزم‌ها کاهش PI منجر به افزایش انرژی مصرفی شده است و مقایسه نتایج مکانیزم‌های مختلف نشان می‌دهد که الگوریتم GG کمترین و الگوریتم MaxTR بیشترین مقدار توان مصرفی را دارند. به دلیل انتخاب دامنه حداکثری توسط MaxTR و دامنه کم توسط GG، تفاوت قابل‌توجهی بین توان مصرفی دو مکانیزم ایجاد کرده است. از سوی دیگر، وجود مسیری بین فرستنده و گیرنده توسط مکانیزم ORA بررسی می‌شود و بنابراین توان مصرفی بیشتری نسبت به GG داشته است. همچنین مشاهده می‌شود که الگوریتم ORA نسبت به DRA توان کمتری را هدر داده است. این اختلاف در توان مصرفی به دلیل آن است که مکانیزم ORA از قبل حل می‌شود و گره‌ها از ابتدای فعالیت خود با دامنه ارسال بهینه شروع به کار می‌کنند، درحالی‌که DRA در تکرارهای اولیه با دامنه ارسال غیربهینه ارسال‌هایی را انجام می‌دهد. نتایج این آزمایش نشان می‌دهد که استفاده از کنترل توپولوژی می‌تواند انرژی مصرفی را کاهش دهد.

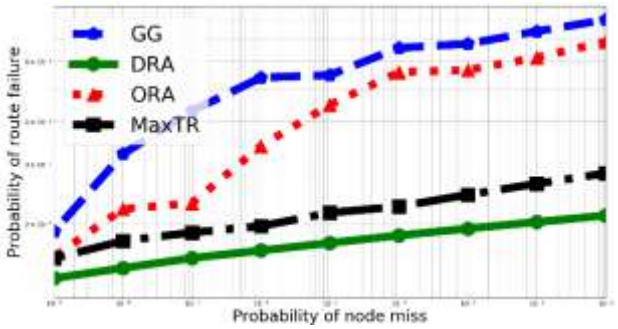


شکل ۶: مجموع انرژی مصرفی گره‌های شبکه

۵ ۴ -قابلیت اطمینان

بعد از شکل‌گیری اولیه گره‌ها در شبکه‌های بی‌سیم، ممکن است گرهی خاموش، خراب و یا از شبکه خارج شود. بنابراین یکی از معیارهای مهم در ارزیابی کارآیی مکانیزم‌های جدید، مقاومت آن نسبت به حذف گره‌های شبکه یا قابلیت اطمینان است. در شکل ۷، احتمال خطا در مسیر بین فرستنده و گیرنده با افزایش احتمال حذف گره‌های شبکه نمایش داده شده است. نتایج نشان می‌دهد که احتمال قطع ارتباط مکانیزم GG نسبت به دیگر مکانیزم‌ها بیشتر است و DRA کمترین احتمال را دارد. نتایج مناسب الگوریتم DRA به دلیل آن است که گره‌های شبکه به‌طور پیوسته و پویا، الگوریتم DRA را اجرا می‌کنند و با خرابی گره‌های شبکه، توپولوژی شبکه تغییر داده می‌شود و مسیرهای جدیدی برای عبور جریان شبکه ایجاد می‌کند. البته در برخی از حالات ممکن است با خرابی و یا از کار افتادن یک گره، نتوان مسیر را بازیابی کرد. اما در بهینه‌سازی ORA قابلیت اطمینان نادیده

گرفته شده است و احتمال خرابی مسیر نسبت به الگوریتم DRA بیشتر است. نکته حائز اهمیت آن است که MaxTR با احتمال بیشتری نسبت DRA مسیر بین فرستنده و گیرنده را از دست می‌دهد.



شکل ۷: اثر خرابی در از دست رفتن مسیر

۶ نتیجه‌گیری

در این تحقیق ترکیب مسئله اختصاص دامنه و مسیریابی به‌صورت یک مدل بهینه‌سازی ارائه شده است که این مدل می‌تواند محققان را در شناسایی و درک مسئله یاری کند. اما استفاده از این مدل بهینه‌سازی در شبکه‌های بی‌سیم بزرگ غیرممکن و غیرعملی است، زیراکه جمع‌آوری تمام اطلاعات یک شبکه بی‌سیم در یک گره هزینه بالایی از جهت انرژی مصرفی به شبکه تحمیل می‌کند و از سوی دیگر حل مسائل بهینه‌سازی بزرگ در گره مرکزی به زمان زیاد و حافظه بزرگ نیاز دارد. بنابراین، در این تحقیق یک الگوریتم مبتنی بر روش زیرگرادیان و تکنیک تفکیک بر اساس تابع زیرگرادیان ارائه شده است که می‌تواند مسئله ارائه شده را به‌صورت توزیع‌شده حل کند. نتایج شبیه‌سازی نشان می‌دهد که روش پیشنهادی بعد از تعداد تکرار مناسب می‌تواند دامنه ارسال بهینه را برای گره‌ها مشخص کند.

ارزیابی کارآیی مکانیزم‌های پیشنهادی با شبیه‌سازی انجام شد و نتایج شبیه‌سازی نشان می‌دهد که نسبت به مدل بهینه، استفاده از الگوریتم توزیع‌شده مصرف انرژی و تأخیر بیشتری دارد. اما الگوریتم توزیع‌شده پیشنهادی نسبت به خرابی در گره‌های شبکه، قابلیت اطمینان بیشتری فراهم می‌کند.

تقدیر و تشکر

این مقاله مستخرج از طرح پژوهشی با عنوان "انتخاب زیرگراف کدگذاری شبکه در شبکه‌های بی‌سیم چندپخشی بر اساس طول صف" است که در دانشگاه آزاد اسلامی واحد خمین انجام شده است.

مراجع

[۱] مریم کاکاوند میرزایی و جلیل سیفعلی هرسینی، «طراحی یک مکانیسم تدافعی برای بهبود امنیت در لایه فیزیکی با رویکرد نظریه بازی‌ها: کاربرد در شبکه‌های اقتضایی خودرویی،» مجله مهندسی برق دانشگاه تبریز، دوره ۴۷، شماره ۱، صفحات ۲۱۱-۲۲۰، ۱۳۹۶.

[2] A. Bhattacharya and K. Sinha, "An efficient protocol for load-balanced multipath routing in mobile ad hoc networks," Ad Hoc Networks, vol. 63, pp. 101-114, 2017.

[۳] محمود پرنده و سیدهادی اقدسی علمداری، «ارائه پروتکل ارسال داده انرژی-کارا مبتنی بر موقعیت برای شبکه‌های حسگر بصری،» مجله مهندسی برق دانشگاه تبریز، دوره ۴۷، شماره ۱، صفحات ۲۹-۳۸، ۱۳۹۶.

[4] R. Tynan, G. M. P. O'Hare, and A. Ruzzelli, "Autonomic wireless sensor network topology control," in IEEE International Networking, Sensing and Control, pp. 7-13, 2007.

[5] Z. Ming, and X. Bugong, "Layer-based self-organizing topology control for sensor networks," in 27th Chinese Control Conference CCC, pp. 516 – 520, 2008.

[6] A. Youssef, A. Agrawala, and M. Younis, "Accurate anchor-free node localization in wireless sensor networks," in 24th IEEE International Performance, Computing, and Communications Conference, IPCCC, pp. 465-470, 2005.

[7] M. Khalily-Dermany, and M. J. Nadjafi-Arani, "Itinerary planning for mobile sinks in network-coding-based wireless sensor networks." Computer Communications, vol. 111, pp. 1-13, 2017.

[8] K. Sohraby, D. Minoli, and T. F. Znati, *Wireless Sensor Networks: Technology, Protocols, and Applications*, Wiley-Interscience, 2007.

[9] P. Santi, *Topology Control in Wireless Ad Hoc and Sensor Networks*, Wiley, 2005.

[10] M. Khalily-Dermany, M. Shamsi, and M. Nadjafi-Arani, "A convex optimization model for topology control in network-coding-based-wireless-sensor networks," Ad Hoc Networks, vol. 59, pp. 1-11, 2017.

[11] L. Li, J. Y. Halpern, P. Bahl, Y. M. Wang, and R. Wattenhofer, "A cone-based distributed topology-control algorithm for wireless multi-hop networks," IEEE/ACM Transactions on Networking, vol. 13, no. 1, pp. 147-159, 2005.

[12] M. A. Labrador, and P. M. Wightman, *Topology Control in Wireless Sensor Networks: with a Companion Simulation Tool for Teaching and Research*, Springer, 2009.

[13] E. Alotaibi, and B. Mukherjee, "A survey on routing algorithms for wireless Ad-Hoc and mesh networks," Computer Networks, vol. 56, no. 2, pp. 940-965, 2012.

[14] A. Cerpa, and D. Estrin, "ASCENT: Adaptive self-configuring sensor networks topologies," IEEE transactions on mobile computing, vol. 3, no. 3, pp. 272-285, 2004.

[15] M. Khalily-Dermany, "A convex programming for range assignment to optimize lifetime in network-coding-based-wireless-sensor networks," International Journal of Wireless Information Networks, pp. 1-6, 2017.

[16] R. K. Ahuja, T. L. Magnanti, and J. B. Orlin, *Network Flows: Theory, Algorithms, And Applications*, Prentice-Hall, Inc., 1993.

[17] R. Ahlswede, C. Ning, S. Y. R. Li, and R. W. Yeung, "Network information flow," IEEE Transactions on Information Theory, vol. 46, no. 4, pp. 1204-1216, 2000.

[18] M. Khalily-Dermany, M. Sabaei, and M. Shamsi, "Topology control in network–coding–based–multicast wireless sensor networks," International Journal of Sensor Networks, vol. 17, no. 2, pp. 93-104, 2015.

[19] M. Khalily-Dermany, and S. Sharifian, "Effect of various topology control mechanisms on maximum information flow in wireless sensor networks," Smart CR, vol. 5, no. 1, pp. 10-18, 2015.
[20] F. Hamzeloei and M. Khalily-Dermany, "A TOPSIS based cluster head selection for wireless sensor network," Procedia Computer Science, vol. 98, pp. 8-15, 2016/01/01 2016.
[۲۱] یاسر عظیمی، وحید هاشمی‌فرد و جمشید باقرزاده «تشخیص توزیع شده و مشارکتی حمله کرمچاله در شبکه‌های حسگر بی‌سیم،» مجله مهندسی برق دانشگاه تبریز، دوره ۴۶، شماره ۴، صفحات ۱۹۵-۲۰۶، ۱۳۹۵.
[22] S. Boyd and L. Vandenberghe, *Convex Optimization*, Cambridge University Press, 2004.
[23] A. Ramamoorthy, "Minimum cost distributed source coding over a network," IEEE Transactions on Information Theory, vol. 57, no. 1, pp. 461-475, 2011.
[24] D. Lianghui, W. Ping, W. Hao, P. Zhiwen, and Y. Xiaohu, "Lifetime maximization with inter-session network coding in energy constrained wireless networks," in IEEE 73rd Vehicular Technology Conference (VTC Spring), pp. 1-5, 2011.
[25] P. Yuyang, F. Al-Hazemi, R. Boutaba, F. Tong, I. Hwang, and C. Youn, "Enhancing energy efficiency via cooperative MIMO in wireless sensor networks: State of the art and future research directions," IEEE Communications Magazine 55, no. 11, pp. 47-53, 2017.
[26] T. Cui, L. Chen, and T. Ho, "On distributed scheduling in wireless networks exploiting broadcast and network coding," IEEE Transactions on Communications, vol. 58, no. 4, pp. 1223-1234, 2010.
[27] D. P. Bertsekas, A. Nedić, and A. E. Ozdaglar, *Convex Analysis and Optimization*, Athena Scientific, 2003.
[28] D. P. Bertsekas, *Constrained optimization and Lagrange multiplier methods*, Athena Scientific, 1996.
[29] V. Shah-Mansouri, and V. W. S. Wong, "Maximum-lifetime coding subgraph for multicast traffic in wireless sensor networks," in IEEE Global Telecommunications Conference, GLOBECOM, pp. 1-6, 2008.

زیرنویس‌ها

[1] Wireless ad-hoc networks
[2] Sub-gradient
[3] Path loss
[4] Fading
[5] Range Assignment
[6] Critical Transmission Range
[7] Local Minimum Spanning Tree
[8] Fault-tolerant local spanning subgraph
[9] Geographical adaptive fidelity
[10] Cone-Based Topology Control
[11] Angular topology control with directional antennas
[12] Distributed relative neighbor graph protocol
[13] Yao Graph
[14] Relative Neighbor Graph
[15] Gabriel Graph
[16] Delaunay Triangulation
[17] Disk graph
[18] Analytical
[19] Dijkstra
[20] Flow conservation
[21] Lagrange function
[22] Karush–Kuhn–Tucker conditions
[23] Gradient
[24] Sub-differential
[25] Optimized Range Assignment
[26] Distributed Range Assignment
[27] End to end delay
[28] Packet Interval
[29] Time Division Multiple Access