

A New Algorithm for Link Scheduling in MIMO Wireless Mesh Networks with Various Interference Condition by Ant Colony Algorithm**Sadegh Zarmahi^{1,2}, Ph.D. Student, Sayed Mahmoud Daneshvar-Farzanegan^{1,2}, Assistant Professor, Avid Avokh^{1,3}, Assistant Professor**¹Department of Electrical Engineering- Najafabad Branch, Islamic Azad University, Najafabad, Iran²Smart Micro Grids Research Center- Najafabad Branch, Islamic Azad University, Najafabad, Iran³Digital Processing and Machine Vision Research Center- Najafabad Branch, Islamic Azad University, Najafabad, Iran

szarmehi@sel.iaun.ac.ir, m_daneshvar@pel.iaun.ac.ir, aavokh@pel.iaun.ac.ir

Abstract

Wireless mesh networks are appropriate and cost-effective infrastructure for Internet but due to the limited scalability and capacity, a lot of research has been doing on new ways to improve these limitations such as optimization of scheduling, routing, etc. In this paper focusing on time division multiple access (TDMA) method, a new algorithm called ant colony for link scheduling in mesh networks (ALSM) based on Ant Colony algorithm is proposed which reduces the possibility of collision to zero by scheduling links. In this algorithm, we will try to size super frames and assign each link to a time slot in such a way that limitations are satisfied and finally, the end-to-end latency is minimized. In multi-input multi-output (MIMO) networks, we face two types of interference (weak and strong). In ALSM, the ant colony has been modified in such a way that the optimal timing of the links can be obtained by considering these two types of interferences. Our results show that ALSM algorithm can schedule links with shorter super frames compared to other recent algorithms.

Keywords: ant colony algorithm, link scheduling, multi-input multi-output antenna, strong and weak interference, wireless mesh network**Received:** 9 August 2022**Revised:** 10 September 2022**Accepted:** 16 October 2022**Corresponding Author:** Dr. Sayed Mahmoud Daneshvar-Farzanegan

<https://dorl.net/dor/20.1001.1.23223871.1403.15.58.3.4>

مقاله پژوهشی

ارائه یک الگوریتم جدید برای زمان‌بندی پیوند شبکه‌های توری بی‌سیم چند ورودی-چند خروجی با تداخل متفاوت بر مبنای کلونی مورچگان

صادق زرمهی^{۱،۲}، دانشجوی دکتری، سید محمود دانشور-فرزانگان^{۱،۲}، استادیار، آوید آوخ^{۱،۳}، استادیار

۱-دانشکده مهندسی برق- واحد نجف‌آباد، دانشگاه آزاد اسلامی، نجف‌آباد، ایران

۲-مرکز تحقیقات ریز شبکه‌های هوشمند- واحد نجف‌آباد، دانشگاه آزاد اسلامی، نجف‌آباد، ایران

۳-مرکز تحقیقات پردازش دیجیتال و بینایی ماشین- واحد نجف‌آباد، دانشگاه آزاد اسلامی، نجف‌آباد، ایران

szarmehi@sel.iaun.ac.ir, m_daneshvar@pel.iaun.ac.ir, aavokh@pel.iaun.ac.ir

چکیده: اگر چه شبکه‌های بی‌سیم نسل جدید از نظر هزینه‌ی نصب و توسعه، فن‌آوری مناسبی برای زیرساخت اینترنت محسوب می‌شوند، ولی به دلیل محدودیت در ظرفیت و مقیاس پذیری، چالش‌های زیادی را مانند زمان‌بندی پیوند و مسیریابی به دنبال دارند. در این مقاله، با تمرکز بر روش دسترسی چندگانه تقسیم زمانی الگوریتم جدیدی با عنوان کلونی مورچه‌ها برای زمان‌بندی پیوند در شبکه‌های مش (ALSM) بر مبنای رنگ‌آمیزی گراف و الگوریتم کلونی مورچگان ارائه شده که با زمان‌بندی پیوندها امکان تصادم را به صفر می‌رساند. در این الگوریتم سعی خواهد شد اندازه ابرقاب‌ها و اختصاص هر پیوند به یک شکاف زمانی به گونه‌ای باشد که با توجه به محدودیت تداخل پیوندها و نیز درجه آزادی آنتن‌های مورد استفاده برای ارسال یا دریافت، تأخیر انتها به انتها کاهش و ظرفیت شبکه افزایش یابد. در شبکه‌های توری بی‌سیم چند ورودی-چند خروجی دو نوع تداخل (تداخل ضعیف و قوی) وجود دارد. در ALSM، الگوریتم کلونی مورچگان به گونه‌ای اصلاح شده که بتوان با در نظر گرفتن این دو نوع تداخل، زمان‌بندی بهینه پیوندها را به دست آورد. نتایج این تحقیق نشان می‌دهد که الگوریتم ALSM در مقایسه با الگوریتم‌های دیگری که در سال‌های اخیر ارائه شده است با طول ابرفریم کوتاه‌تری می‌تواند زمان‌بندی پیوندها را انجام دهد.

کلمات کلیدی: آنتن چندورودی-چندخروجی، الگوریتم کلونی مورچگان، تداخل ضعیف و قوی، زمان‌بندی پیوند، شبکه توری

بی‌سیم

تاریخ ارسال مقاله: ۱۴۰۱/۵/۱۸

تاریخ بازنگری مقاله: ۱۴۰۱/۶/۱۹

تاریخ پذیرش مقاله: ۱۴۰۱/۷/۲۴

نام نویسنده‌ی مسئول: دکتر سید محمود دانشور-فرزانگان

نشانی نویسنده‌ی مسئول: نجف‌آباد- بلوار دانشگاه- دانشگاه آزاد اسلامی واحد نجف‌آباد- دانشکده مهندسی برق

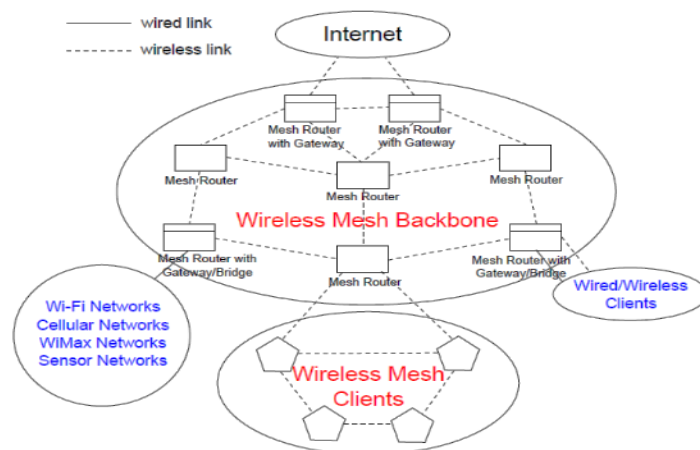
۱- مقدمه

سرعت گسترش و رواج روزافزون اینترنت در دنیای امروزی چنان است که ساختارهای سیمی جواب‌گوی نیاز بسیاری از مناطق نیستند. تعداد مراکز ارائه‌دهنده خدمات پرسرعت اینترنت به نسبت تقاضا کم بوده و کابل‌کشی این خطوط پرسرعت برای تمامی این سرویس‌دهندگان بسیار پرهزینه و زمان‌بر است. شبکه‌های بی‌سیم به عنوان یک فناوری جایگزین که امکان دسترسی سریع به اینترنت را فراهم می‌آورد، معرفی شده‌اند. شبکه‌های توری بی‌سیم^۱ فناوری مناسبی برای استفاده در زیر ساخت اینترنت بی‌سیم هستند چرا که از نظر هزینه پایین بوده و نصب و توسعه آن‌ها ساده است [۱]. همچنین این شبکه‌ها قابلیت خود-پیکربندی^۲ و خود-سازمان‌دهی^۳ دارند [۲] و در کاربردهایی چون حوزه سلامت، اینترنت اشیا^۴، هوشمندسازی شهرها و تأمین اینترنت خصوصاً در مناطق روستایی مناسب هستند [۳-۵].

شبکه‌های توری بی‌سیم در برخی از منابع با نام شبکه‌های موردی^۵ [۶] نیز ذکر شده‌اند اما با این شبکه‌ها یک سری تفاوت‌ها دارند. از جمله این‌که در شبکه‌های توری گره‌ها ثابت هستند و در شبکه‌های موردی گره‌ها متحرک هستند و به دلیل این متحرک بودن بحث شارژ کردن و ذخیره انرژی در آن‌ها مطرح است. در شبکه‌های توری بی‌سیم گره‌ها به برق شهر وصل هستند و چالشی در خصوص حفظ و شارژ انرژی وجود ندارد.

شبکه‌های توری بی‌سیم محدودیت‌هایی نظیر پهنای باند پایین، تداخل و از دست رفتن بسته‌های ترافیکی در زمان انتقال بسته‌ها میان مسیر یاب‌ها^۶ دارند. اگرچه در کاربردهایی مانند سرویس پست الکترونیکی تأخیر اهمیت چندانی ندارد، اما در مورد سرویس‌های برخط که در کاربردهای امروز بیشتر مورد توجه است، تأخیر و اتلاف داده بسیار مهم است. زمان‌بندی مناسب در استفاده از منابع تأثیر زیادی در کیفیت سرویس دارد. هنگامی که یک کاربر به شبکه دسترسی پیدا می‌کند، ممکن است برخی از قسمت‌های شبکه به دلیل عدم زمان‌بندی مناسب در استفاده از منابع آن‌قدر پرتراфик باشد که ترافیک منتقل نشود یا آنقدر تأخیر داشته باشد که در عمل نیاز کاربر را برآورده نسازد. در صورتی که بتوان الگوریتم زمان‌بندی را برای ارسال و دریافت بسته‌ها با کارایی بالا با توجه به محدودیت تداخل به کار گرفت، هم تأخیر و هم نرخ از دست رفتن بسته‌ها کاهش می‌یابد [۷]. به عبارت دیگر قابلیت اطمینان به شبکه و در نتیجه کارایی شبکه در کاربردهایی که این قابلیت اطمینان از حساسیت بالاتری برخوردار است، مانند کاربردهای نظامی، افزایش خواهد یافت.

یک شبکه توری بی‌سیم را می‌توان به صورت مجموعه‌ای از گره‌های رادیویی که مطابق همبندی توری با یکدیگر در ارتباطند، تعریف نمود. نمونه‌ای از یک شبکه توری بی‌سیم در شکل (۱) نشان داده شده است. یک شبکه توری از مجموعه‌ای از مشتری‌های توری^۷، مسیر یاب‌ها و دروازه‌ها^۸ تشکیل شده است. مشتری‌ها کاربرانی هستند که ترافیک ورودی به شبکه را تولید می‌کنند. مسیر یاب‌ها که به صورت بی‌سیم با یکدیگر در ارتباطند، ترافیک تولید شده را به سمت دروازه‌ها که به منظور اتصال به اینترنت یا شبکه دیگر مورد استفاده قرار می‌گیرند، هدایت می‌کنند [۸].



شکل (۱): نمونه‌ای از یک ساختار ممکن برای شبکه‌ی توری بی‌سیم [۱۰]

Figure (1): An example of a possible structure for wireless mesh network [10]

مسیرهای توری ستون فقرات ارتباطی را تشکیل می‌دهند. همان‌طور که در شکل (۱) مشاهده می‌شود، دو مسیر یاب به اینترنت متصل هستند و سایر مسیر یاب‌ها به چندین مدار واسط مجهزند که به آن‌ها این امکان را می‌دهد که به عنوان دروازه برای سایر شبکه‌های بی‌سیم عمل کنند (به طور مثال در وای‌مکس^۸). مسیرهای توری مسئولیت انتقال بسته‌ها به/از اینترنت و سایر گره‌هایی که جزئی از شبکه توری هستند را به عهده دارند [۹]. این به این معنی است که مسیرهای توری بخش عمده ترافیک را حمل می‌کنند. مشتری‌های توری می‌توانند لپ‌تاپ، آیفون، آپد و غیره باشند.

به دلیل مقیاس‌پذیری پایین و ظرفیت کم شبکه‌های توری بی‌سیم، تحقیقات زیادی در زمینه روش‌های جدید برای بهبود این نوع از شبکه‌ها صورت پذیرفته است که می‌توان به زمان‌بندی ارتباطات، مسیریابی و غیره اشاره کرد [۸]. یکی از روش‌هایی که برای بهبود این نوع از شبکه‌ها ارائه شده است، تجهیز کردن مسیرهای یاب‌ها به چندین رادیو است که در نتیجه مسیرهای قابلیت ارسال یا دریافت چندگانه را پیدا می‌کنند. این نوع از مسیرهای یاب‌ها مجهز به N آنتن یا رادیو هستند و می‌توانند تا N عمل دریافت یا ارسال از هم سایه‌های مجزا را به صورت همزمان انجام دهند. به این قابلیت چند از سال/دریافت چندگانه^{۱۰} (MTR) گفته می‌شود. اما در برخی از مسیرهای یاب‌ها نمی‌توان همزمان عمل ارسال و دریافت را با هم انجام داد که به این محدودیت محدودیت یک سوپه^{۱۱} گفته می‌شود. در شکل (۲) یک مثال از ارسال و دریافت همزمان آورده شده است. همان‌طور که مشاهده می‌شود، گره A قادر به ارسال و دریافت همزمان به/از سه همسایه مجاور خود در شکاف‌های زمانی ۱ و ۲ است. یعنی دارای رادیو یا سیستم رادیویی مناسبی در این خصوص است که در یک دسته ارسال و در دسته دیگر دریافت سیگنال را به طور همزمان انجام می‌دهد. البته باید اذعان کرد این کار در یک سیستم عادی رادیویی به دلیل تداخل شدید در ارسال و دریافت امری دشوار است. در ادامه به روش‌های عملی برای تحقق این نیاز در شبکه‌های توری بی‌سیم خواهیم پرداخت.

تاکنون، سه دسته روش مختلف برای فعال نمودن قابلیت MTR در یک گره بی‌سیم ارائه شده است: -دسته اول- تجهیز هر گره به چندین رادیوی مختلف در فرکانس‌های گوناگون: با فاصله‌گذاری مناسب در فرکانس هر رادیو و فیلترهای مناسب چندین ارسال و دریافت همزمان ممکن خواهد شد [۱۰].

-دسته دوم- تجهیز گره‌ها با رادیوهای فرکانس ۶۰ گیگاهرتز که ویژگی اصلی باند ۶۰ گیگاهرتز قابلیت جهت‌دهی بالای آن است. علاوه بر این، استفاده از آنتن‌های سرتخت^{۱۲} به این معناست که از تداخل میان گره‌های همسایه می‌توان چشم‌پوشی کرد. در صورتی که ارتباطات به میزان زیادی جهت‌دار باشند می‌توان از تداخلی که به علت ارسال‌های همسایه‌ها ایجاد می‌شود، چشم‌پوشی کرد [۱۰].

-دسته سوم- استفاده از فناوری چند ورودی-چند خروجی^{۱۳} (MIMO) است. به‌طور خاص، هر گره به آرایه‌ای از آنتن‌ها تجهیز می‌شود. در این روش، هر سیگنالی که توسط آنتن دریافت و ارسال می‌شود هوشمندانه ترکیب یا جداسازی می‌شود تا به بهره‌دهی بالاتری رسیده و تداخل کاهش یابد. فناوری چند-ورودی-چند-خروجی امکان دریافت و ارسال همزمان از چندین جریان داده مستقل که از یک باند فرکانس استفاده می‌کنند را فراهم می‌کند. یک فرستنده می‌تواند به‌صورت همزمان چندین جریان داده مستقل را از طریق آنتن‌های مختلف ارسال کند. گیرنده‌ها هم می‌توانند از طریق روش خنثی کردن ترتیبی تداخل با استفاده از حداقل‌سازی میانگین مربعات خطا^{۱۴} جریان‌ها را جداسازی کنند. در سیستم چند ورودی-چند خروجی فرض می‌شود که اطلاعات وضعیت کانال در گره‌های ارسال کننده و دریافت کننده در دسترس است. در این سیستم به‌صورت متناوب یک سری سبیل شاخص یا پایلوت برای به‌دست آوردن وضعیت کانال ارسال می‌شود. یکی از ویژگی‌های مهم این سیستم این است که توسط آن می‌توان زیر مجموعه‌ای از آنتن‌ها را برای خنثی کردن تداخل به/از گره‌های همسایه استفاده کرد که این موضوع سبب افزایش استفاده مجدد مکانی خواهد شد [۱۰]. به فرآیند تعیین تعداد آنتن‌ها برای ارسال و خنثی کردن تداخل، کنترل جریان نیز گفته می‌شود. همان‌طور که توضیح داده شد مشخصه چند-ورودی-چند-خروجی این است که گره‌ها می‌توانند به‌صورت همزمان عمل ارسال و دریافت را انجام دهند. این موضوع سبب می‌شود که مدل تداخلی کاملاً متفاوتی در مقایسه با روش‌های قبلی که مدل تداخلی را در سطح پروتکل یا لایه‌ی فیزیکی در نظر می‌گرفتند، وجود داشته باشد [۱۱].

ظرفیت یک شبکه توری بی‌سیم بستگی به زمان‌بندی مناسب پیوندها دارد به‌طوری که ارتباطاتی که در حال ارسال داده هستند هیچ تصادمی را تجربه نکنند و گره‌های دریافت کننده نیز به درستی داده‌ها را دریافت کنند [۱۲]. در این مقاله از روش دسترسی

چندگانه تقسیم زمانی^{۱۵} (TDMA) برای زمان‌بندی پیوندها استفاده شده است. مزیت این روش این است که هیچ تصادمی رخ نخواهد داد. علاوه بر این ظرفیت شبکه حداکثر می‌شود. در روش TDMA از یک ابرفریم که از تعدادی شکاف زمانی تشکیل شده است، استفاده می‌شود [شکل (۳)]. پیوندهایی که تداخلی با یکدیگر ندارند، می‌توانند در یک شکاف زمانی عمل ارسال را انجام دهند.

مسئله زمان‌بندی پیوند در شبکه توری بی‌سیم چند-ورودی چند-خروجی شامل اختصاص آنتن برای ارسال یا دریافت داده و خنثی کردن تداخل نیز هست. در هر شکاف زمانی، تعداد کل آنتن‌هایی که توسط یک گره برای ارسال یا دریافت جریان و همچنین حذف تداخل مورد استفاده قرار می‌گیرند باید کمتر یا مساوی تعداد آنتن‌های آن باشد. بنابراین یک زمان‌بندی کننده باید به‌طور کارایی آنتن‌ها را در هر گره مشخص کند تا تعداد پیوندهای ارسال‌کننده در هر شکاف زمانی بیشینه شود [۱۳].

در این مقاله یک روش جدید با نام کلونی مورچه‌ها برای زمان‌بندی پیوند در شبکه‌های توری بی‌سیم^{۱۶} (ALSM) ارائه شده که از الگوریتم کلونی مورچگان^{۱۷} [۱۴] برای پیدا کردن ترتیب بهینه پیوندها استفاده می‌کند. الگوریتم کلونی مورچگان یکی از بهترین الگوریتم‌ها در حل مسائل بهینه‌سازی به ویژه در مسائل مسیریابی و زمان‌بندی است [۱۷-۱۵] و با توجه به دانش نویسندگان تا به حال برای حل مسئله زمان‌بندی پیوند در شبکه‌های توری بی‌سیم مورد استفاده قرار نگرفته است. همچنین در شبکه توری بی‌سیم چند-ورودی چند-خروجی دو نوع تداخل میان پیوندها وجود دارد (تداخل قوی و ضعیف). در الگوریتم ارائه شده زمان‌بندی به گونه‌ای انجام می‌شود که این دو نوع تداخل را در نظر می‌گیرد. الگوریتم ارائه شده شامل سه مرحله است: مرحله اول- ایجاد گراف از روی شبکه توری بی‌سیم و تبدیل مسئله زمان‌بندی به مسئله رنگ‌آمیزی گراف با دو نوع یال ضعیف و قوی برای نشان دادن تداخل قوی و ضعیف میان پیوندها

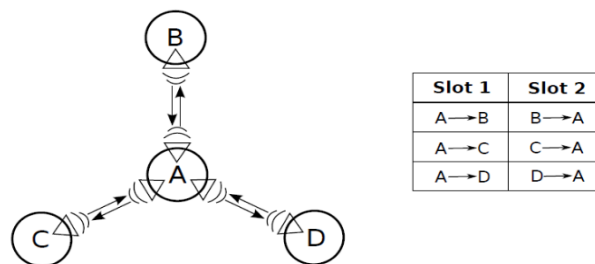
مرحله دوم- اجرای الگوریتم کلونی مورچگان برای پیدا کردن ترتیب بهینه پیوندها در هر شکاف زمانی

مرحله سوم- اختصاص آنتن برای ارسال، دریافت یا حذف تداخل در گره‌ها

نتایج حاصل از شبیه‌سازی نشان می‌دهد که این الگوریتم نسبت به الگوریتم‌های مشابه که اخیراً ارائه شده‌اند، با طول ابرفریم کوتاه‌تر قادر است زمان‌بندی پیوندها را انجام دهد. ساختار مقاله در ادامه به این شرح است. در بخش ۲ به‌طور مختصر تحقیقات صورت گرفته در گذشته ارائه شده است. بخش ۳ صورت مسئله در نظر گرفته شده در این مقاله شرح داده شده است. الگوریتم ارائه شده در این مقاله در بخش ۴ توضیح داده شده است. در بخش ۵ نتایج حاصل از شبیه‌سازی و مقایسه الگوریتم با الگوریتم‌های مشابه شرح داده شده است. در نهایت نیز نتیجه‌گیری در بخش ۶ بیان شده است.

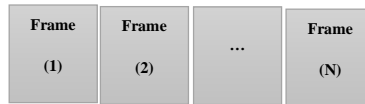
۲- مروری بر تحقیقات گذشته

در مرجع [۱۸] مسئله مسیریابی و زمان‌بندی توأم به‌صورت یک مسئله برنامه‌ریزی خطی فرمول‌بندی شده که در آن با هدف بیشینه‌کردن ترافیک عبوری از شبکه با در نظر گرفتن محدودیت‌های مورد نظر شامل ظرفیت پیوندها و رادیوها، مسئله حل شده است. در روش پیشنهادی این مقاله یک گره در هر شکاف زمانی تنها می‌تواند یک جریان داده‌ای را عبور دهد و سایر آنتن‌ها برای خنثی کردن تداخل مورد استفاده قرار می‌گیرند. در مرجع [۱۰] مسئله مسیریابی و زمان‌بندی توأم در شبکه‌ی توری بی‌سیم چند-ورودی-چند-خروجی مورد بررسی قرار گرفته و الگوریتمی تحت عنوان Algo-Fair ارائه شده است. این الگوریتم مسیر بهینه‌ای که بیشینه سربار پیوندها را کمینه کرده و کمترین تعداد شکاف زمانی را برای زمان‌بندی پیوندها استفاده می‌کند.



شکل (۲): مثالی از یک شبکه‌ی بی‌سیم چند ارسال/دریافت [۱۰]

Figure (2): An example of an MTR wireless network [10]



شکل (۳): ساختار یک ابرفریم (تشکیل هر ابرفریم از یک سری شکاف‌های زمانی)
Figure (3): Structure of a super frame. Each super frame composes of a series of time slots

در مرجع [۹] مسئله حداقل کردن طول ابرفریم‌ها در نظر گرفته شد. آن‌ها یک الگوریتم ابتکاری بر اساس گراف تصادم^{۱۸} ارائه دادند. در این الگوریتم، رأسی که بیشترین پیوندهای خروجی را دارد در اولویت قرار می‌گیرد و الگوریتم آن را به شکاف زمانی تخصیص می‌دهد که سبب افزایش بیشتری در گذردهی شود. سپس الگوریتم به سراغ رأس بعدی که از نظر تعداد خروجی در مرتبه‌ی دوم قرار دارد رفته و همین روش تخصیص را تکرار می‌کند، تا زمانی که به کلیه‌ی ارتباطاتی که در مسیرهای عبور ترافیک قرار دارند، شکاف زمانی اختصاص داده شود. در مرجع [۱۹] مسئله‌ی زمان‌بندی پیوندها به صورت یک مسئله برنامه‌ریزی غیرخطی مدل شده و یک الگوریتم ابتکاری برای حل آن ارائه شده است. در مرجع [۲۰] برای حل مسئله‌ی زمان‌بندی پیوندها، استفاده از برنامه‌نویسی پویا پیشنهاد شده است. در مرجع [۲۱] پروتکل TDMA تغییر داده شده و یک پروتکل جدید تحت عنوان دسترسی متوسط با کنترل رسانه‌ای^{۱۹} (SCMA) ارائه شده که این پروتکل از نظر تأخیر و گذردهی شبکه عملکرد بهتری دارد. در مرجع [۲۲] از الگوریتم ژنتیک برای حل مسئله‌ی مسیریابی و زمان‌بندی پیوندها در شبکه‌ی توری بی‌سیم استفاده شده و نشان داده شده که این الگوریتم می‌تواند زمان‌بندی قابل قبولی برای شبکه پیدا کند. در مرجع [۲۳] پروتکلی تحت عنوان پروتکل لایه پیوند تعادل بار^{۲۰} (LBLEP) ارائه شده است که این پروتکل قادر به حل توأم مسئله‌ی زمان‌بندی و تخصیص کانال است. در مرجع [۲۴] یک الگوریتم چند جمله‌ای برای زمان‌بندی پیوندها در شبکه توری بی‌سیم ارائه و نشان داده شده که این الگوریتم قادر است برای یک شبکه با ۲۰۰۰ گره تقریباً در عرض ۲/۵ دقیقه زمان‌بندی را انجام دهد. بر اساس طول صف و ریسک تصادم یک روش زمان‌بندی برای شبکه توری بی‌سیم در مرجع [۲۵] ارائه شده که این روش می‌تواند گذردهی شبکه را در زمان‌هایی که بار ترافیکی شبکه بالاست، به میزان قابل توجهی بالا ببرد. در مرجع [۲۶] مسئله زمان‌بندی با هدف بیشینه کردن ظرفیت شبکه توری بی‌سیم با استفاده از رنگ‌آمیزی گراف حل شده است. با استفاده از فرایند تصمیم‌گیری مارکوف الگوریتمی برای زمان‌بندی و اختصاص آنتن در شبکه بی‌سیم چندورودی-چندخروجی در مرجع [۲۷] ارائه شده است. در مرجع [۳۳] یک الگوریتم حریصانه^{۲۱} برای زمان‌بندی پیوند در شبکه بی‌سیم چندورودی-چندخروجی ارائه شده و از فن‌آوری لغو تداخل بی‌درپی برای حذف تداخل میان پیوندها استفاده شده است. در مرجع [۳۴] مسئله‌ی زمان‌بندی پیوند در شبکه بی‌سیم چندورودی-چندخروجی با ارائه الگوریتم ابتکاری بر مبنای محاسبه وزن^{۲۲} برای پیوندها و تولید مجموعه پیوندهای کاندیدی که می‌توانند با هم فعال باشند، حل شده است.

اخیراً در یک سری از تحقیقات استفاده از روش‌های یادگیری ماشین و یادگیری عمیق پیشنهاد شده است [۲۸]. در مرجع [۱۱] با تبدیل گراف مسیرهای عبور ترافیک به بردار ویژگی از الگوریتم‌های یادگیری ماشین برای زمان‌بندی پیوندها استفاده شده است. از یادگیری عمیق برای حل مسئله زمان‌بندی در مرجع [۲۹] استفاده شده است. در این روش ابتدا شبکه به دو تصویر بر اساس موقعیت مکانی گره‌ها و وضعیت گره از نظر ارسال و دریافت تبدیل می‌شود. خروجی شبکه در هر شکاف زمانی نشان می‌دهد که آیا نود باید در آن فعال باشد یا خیر. در مرجع [۳۰] از یادگیری تقویتی برای حل مسئله‌ی زمان‌بندی استفاده شده که این روش عملکرد خوبی در حل این مسئله دارد. چالش اساسی در استفاده از روش‌های یادگیری عدم وجود مجموعه داده آموزشی مناسب برای آموزش مدل‌ها است.

۳- صورت مسئله

یک شبکه توری بی‌سیم چندورودی-چندخروجی و مبتنی بر زمان‌بندی TDMA را در نظر بگیرید. فرض کنید زمان به یک سری شکاف تقسیم شده است به طوری که هر شکاف برای ارسال یک بسته کافی است. هر ابرقاب S از |S| شکاف زمانی تشکیل شده است که در آن به هر پیوند یک یا تعداد بیشتری شکاف زمانی اختصاص داده می‌شود. فرض می‌شود که یک الگوریتم مسیریابی، مسیرها را برای عبور ترافیک مشخص می‌کند و بنابراین تقاضای ترافیکی d_e برای هر پیوند ارتباطی از قبل مشخص

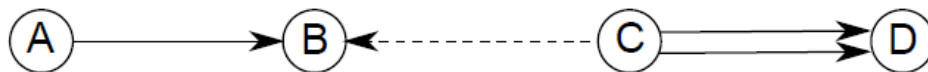
است. $G(V,E)$ گرافی است که در آن V نشان‌دهنده مجموعه گره‌ها و E پیوندهای جهت‌دار بین گره‌ها است. در این گراف تنها پیوندهایی در نظر گرفته می‌شوند که تقاضای ترافیکی برای آن‌ها بیشتر از صفر باشد، به عبارت دیگر d_e بزرگ‌تر از صفر باشد. هر مسیریاب $i \in V$ به A_i آنتن مجهز است که بیشتر یا برابر یک است. فرض می‌شود هر گره به اندازه کافی آنتن برای ایجاد پیوند ارتباطی با کلیه همسایگان را دارد. این فرض منطقی است چرا که سیستم‌هایی چون آگروس^{۲۳} [۱۹] به هر مسیریاب این اجازه را می‌دهند که تا ۶۴ آنتن داشته باشند. همچنین تعداد آنتن‌ها را می‌توان با اضافه کردن بردهای وارپ^{۲۴} افزایش داد. تداخل بی‌سیم به صورت مدل پروتکل در نظر گرفته می‌شود. اگر u_i, v_i, u_j, v_j گره‌های مجزا باشند و رابطه زیر برقرار باشد، آن‌گاه پیوند $e_i=(u_i, v_i)$ با گره v_j و پیوند $e_j=(u_j, v_j)$ تداخل دارد.

$$\|u_i - v_j\| \leq R_I \quad (1)$$

که در آن $\|u_i - v_j\|$ فاصله میان دو گره است و R_I دامنه تداخل گره‌ها است. یک گره در یک زمان مشخص می‌تواند در حال ارسال، دریافت یا حذف تداخل باشد. اما نمی‌تواند به صورت همزمان دریافت و ارسال را انجام دهد.

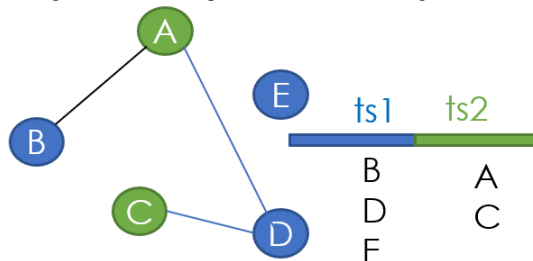
صورت مسئله در این مقاله اختصاص پیوندها به شکاف‌های زمانی به گونه‌ای است که تأخیر انتها به انتها^{۲۵} حداقل شود. همچنین در هر گره باید مشخص شود که چه آنتن‌هایی برای ارسال یا دریافت و خنثی کردن تداخل هستند. زمان‌بندی و تخصیص آنتن برای ارسال، دریافت و حذف تداخل باید به صورتی انجام شود که محدودیت‌های زیر برآورده شوند.

الف- محدودیت اول (زمان‌بندی قابل قبول است که محدودیت بدون انتقال و دریافت مخلوط^{۲۶} (no Mix-Tx-Rx) را رعایت کند): یک گره می‌تواند به صورت همزمان چندین جریان داده را به گره‌های همسایه در یک شکاف زمانی ارسال کند. اما نمی‌تواند همزمان عمل دریافت و ارسال را انجام دهد. همچنین یک گره باید بخشی از آنتن‌ها را برای حذف تداخل استفاده کند. تعداد این آنتن‌ها بستگی به تعداد جریان‌های متداخل دارد. همان‌طور که در شکل (۴) نشان داده شده است گره A در حال ارسال یک جریان داده به گره B است و گره C در حال ارسال دو جریان داده به گره D . گره C دو جریان متداخل با گره B دارد. اگر گره B بخواهد حذف تداخل را انجام دهد باید دو آنتن را اختصاص دهد. اگر گره C بخواهد حذف تداخل را انجام دهد تنها به یک آنتن نیاز دارد چرا که تنها یک جریان متداخل از سمت B وجود دارد. برای حذف تداخل کافی است یکی از گره‌های فرستنده (گره C) یا دریافت‌کننده (گره B) آنتن برای حذف تداخل اختصاص دهد و اگر هر دو طرف آنتن اختصاص دهند سبب به هدر رفتن آنتن‌ها می‌شود. برای اطمینان از این‌که تنها یک طرف آنتن برای حذف تداخل اختصاص دهد، مطابق مرجع [۳۰] به هر گره یک شماره اختصاص داده می‌شود. گره‌ای که شماره بزرگ‌تری دارد مسئول اختصاص آنتن برای حذف تداخل است. در صورتی که A_i تعداد کل آنتن‌های گره i ، $D_i^+ \leq A_i$ تعداد آنتن‌های اختصاص داده شده به گره‌ی i برای عمل ارسال و I_i^+ تعداد آنتن‌ها برای حذف تداخل باشد. همچنین $D_j^- \leq A_j$ آنتن‌های اختصاص داده شده به گره j برای دریافت و I_j^- آنتن‌های اختصاص داده شده برای حذف تداخل در گره j باشد. اگر O_i شماره اختصاص داده شده به گره i و O_j شماره اختصاص داده شده به گره j باشد، آن‌گاه محدودیت دوم به صورت زیر است:



شکل (۴): مثالی از تداخل میان گره‌ها [۱۰]

Figure (4): An example of interference among nodes [10]



شکل (۵): حل مسئله زمان‌بندی ارتباطات با استفاده از رنگ آمیزی گراف

Figure (5): Link scheduling using graph coloring

ب- محدودیت دوم (هر جریان متداخل بایستی توسط گره‌ای که شماره بزرگتری دارد حذف شود): شماره گره‌ها را می‌توان با استفاده از روش‌های مختلفی مشخص کرد. مرجع [۱۰] نشان داد که در صورتی که شماره گره بر اساس تعداد پیوندهای متداخل قرار داده شود، به این صورت که هر چه تعداد پیوندهای متداخل یک گره بیشتر باشد، شماره کمتری بگیرد، به کارایی بالاتری از نظر طول ابرفریم خواهد رسید. در این مقاله نیز از این روش برای شماره‌گذاری گره‌ها استفاده خواهد شد.

ج- محدودیت سوم (مجموع آنتن‌های استفاده شده برای ارسال/دریافت و حذف تداخل در گره‌ی i نباید از تعداد کل آنتن‌های گره بیشتر باشد).

۱-۳- تبدیل مسئله زمان‌بندی پیوند به مسئله رنگ‌آمیزی گراف

در یک شبکه بی‌سیم چندورودی-چندخروجی، زمان‌بندی پیوند را می‌توان با رنگ‌آمیزی گراف تصادم که در این گراف هر رأس متناظر با یک پیوند ارتباطی در شبکه است، تعیین کرد [۸]. در این گراف در صورتی که دو پیوند ارتباطی با یکدیگر تداخل داشته باشند، یک یال میان آن‌ها وجود دارد. مسئله رنگ‌آمیزی گراف، رنگ‌کردن رئوس یک گراف با حداقل تعداد رنگ است به طوری که هیچ دو رأس مجاور هم‌رنگ نباشند. هر رنگ را می‌توان متناظر با یک شکاف زمانی در نظر گرفت. به عنوان مثال در گراف شکل (۵) که با دو رنگ سبز و آبی رنگ‌آمیزی شده است، زمان‌بندی متناظر به صورتی که در همین شکل نشان داده شده است، خواهد بود. این روش برای حالتی که گره‌ها از نوع چندورودی-چندخروجی هستند، خوب عمل نمی‌کند. زیرا زمانی که تعداد آنتن‌های کافی برای خنثی کردن تداخل آن‌ها وجود داشته باشد، پیوندهای متداخل می‌توانند در یک شکاف زمانی قرار گیرند. به همین دلیل برای این نوع شبکه یک گراف تصادم با دو نوع یال در نظر گرفته می‌شود [۸]:

الف- یال قوی^{۲۷}: دو پیوند ارتباطی به هیچ عنوان نمی‌توانند در یک شکاف زمانی قرار گیرند. پیوند ورودی به یک گره با پیوندهای خروجی از آن گره تداخل قوی دارند چرا که در شبکه‌های بی‌سیم چندورودی-چندخروجی نمی‌توان همزمان عمل ارسال و دریافت توسط یک گره را انجام داد. لینک $e_i=(u_i, v_i)$ با لینک $e_j=(u_j, v_j)$ تداخل از نوع قوی دارد اگر و تنها اگر $u_i=v_j$ یا $u_j=v_i$ باشد [۸].

ب- یال ضعیف^{۲۸}: پیوندها با یکدیگر تداخل دارند اما در صورتی که آنتن برای خنثی کردن تداخل استفاده شود، می‌توان آن‌ها را در یک شکاف زمانی هم قرار داد. سه موقعیت مختلف وجود دارد که میان پیوندها تداخل از نوع ضعیف است که در ادامه بیان شده است. در صورتی که $e_i=(u_i, v_i)$ و $e_j=(u_j, v_j)$ اگر: (۱) $u_i=u_j$ (۲) $v_i=v_j$ و (۳) پیوندی وجود داشته باشد مانند $e_k=(u_k, v_k)$ که $\|v_k-u_i\| \leq R_I$ و $\|v_k-u_j\| \leq R_I$ این موقعیت زمانی به وجود می‌آید که دو گره ارسال‌کننده (u_i, u_j) با یک گره دریافت‌کننده v_k تداخل داشته باشند [۸].

۴- روش پیشنهادی

همان‌طور که قبلاً اشاره شد، در روش زمان‌بندی TDMA، یک سری شکاف زمانی وجود دارد و پیوندهایی که تداخلی با یکدیگر ندارند یا این‌که می‌توان تداخل آن‌ها را با اختصاص آنتن خنثی کرد، در یک شکاف زمانی قرار داده می‌شوند. برای مشخص کردن اینکه پیوندهایی که در مسیرهای انتخاب شده توسط الگوریتم مسیریابی قرار دارند، هر یک در کدام شکاف زمانی قرار می‌گیرند، از الگوریتم کلونی مورچگان استفاده شده است. در مورد این مسئله، توالی ورودی‌ها پیوندهایی است که باید در شکاف‌های زمانی قرار گیرند و خروجی شکاف‌های زمانی است که به هر پیوند اختصاص داده شده است. الگوریتم کلونی مورچگان یک الگوریتم معروف در حل مسائل زمان‌بندی است که کارایی خیلی خوبی در حل این نوع مسائل دارد. در بخش قبل نحوه تبدیل مسئله زمان‌بندی به مسئله رنگ‌آمیزی گراف شرح داده شد. در این گراف می‌توان از الگوریتم کلونی مورچگان برای رنگ‌آمیزی استفاده کرد. در ادامه ابتدا الگوریتم کلونی مورچگان برای حل مسئله رنگ‌آمیزی گراف شرح داده شده است. سپس شبه‌کد الگوریتم پیشنهادی ALSM بیان شده است.

۱-۴- الگوریتم کلونی مورچگان برای حل مسئله رنگ‌آمیزی گراف

الگوریتم کلونی مورچگان الگوریتمی است که با الهام از رفتار مورچه‌ها در یافتن کوتاه‌ترین مسیر از لانه تا منبع غذایی ارائه شده است. در این الگوریتم با استفاده از فرومون‌ریزی و تبخیر فرومون امیدواریم که یک بهینه خوب برای حل مسئله دست پیدا گردد. شبه‌کد الگوریتم کلونی مورچگان در شکل (۶) نشان داده شده است. در این الگوریتم تعدادی مورچه^{۲۹} (nants) در نظر گرفته می‌شود که این مورچه‌ها در گراف حرکت کرده و هر کدام راه‌حلی را برای مسئله پیدا می‌کنند. راه‌حلهایی که بر اساس هدف مسئله شایسته‌تر هستند فرومون بیشتری را دریافت می‌کنند. این مراحل به اندازه یک تعداد بار مشخص^{۳۰} (ncycles) تکرار می‌شوند. ابتدا مورچه‌ها به صورت تصادفی بر روی راس‌های گراف قرار داده می‌شوند و رنگ همه‌ی راس‌ها نیز نامشخص است. سپس هر مورچه در گراف حرکت می‌کند و در هر رأسی که قرار می‌گیرد رنگی را برای آن رأس در نظر می‌گیرد. احتمال انتخاب رأس i و انتخاب رنگ k برای رنگ‌آمیزی آن با استفاده از فرمول زیر محاسبه می‌شود [۳۲].

$$P_{ik} = \begin{cases} \frac{\tau_{ik}^\alpha \eta_{ik}^\beta}{\sum_{j \in W} \tau_{jk}^\alpha \eta_{jk}^\beta} & i \in W \\ 0 & \text{else} \end{cases} \quad (2)$$

W رئوسی هستند که هنوز رنگی برای آن‌ها انتخاب نشده است. α و β پارامترهای الگوریتم هستند که باید به صورت دستی تنظیم شوند. $\eta_{ik} = \text{deg}_B(i)$ درجه رأس i در زیرگرافی است که تنها از راس‌های موجود در B تشکیل شده است. B مجموعه راس‌هایی که رنگ ندارند اما نمی‌توان با رنگ k هم آن‌ها را رنگ‌آمیزی کرد. مقدار τ_{ik} نیز که بر اساس میزان فرومون محاسبه می‌شود، با استفاده از فرمول زیر به دست می‌آید [۳۲]. در معادله (۳)، V_k راس‌هایی از گراف هستند که با رنگ k رنگ‌آمیزی شده‌اند.

$$\tau_{ik} = \frac{\sum_{j \in V_k} t_{ij}}{|V_k|} \quad (3)$$

$$t_{ij} = \rho t_{ij} + \sum_{s \in S_{ij}} \frac{1}{q(s)} \quad (4)$$

در معادله بالا t_{ij} میزان فرومون و ρ پارامتر الگوریتم است که باید به صورت دستی تنظیم شود. در شبه‌کد شکل (۶)، علامت / برای نشان دادن عملگر تقسیم مورد استفاده قرار گرفته است.

۲-۴- زمان بندی پیوند با استفاده از الگوریتم کلونی مورچه‌ها برای زمانبندی پیوند در شبکه‌های مش

برای حل مسئله ابتدا با استفاده از یک الگوریتم مسیریابی، پیوندهایی که برای انتقال بسته‌های ترافیکی مورد استفاده قرار می‌گیرند مشخص شده و سپس گراف تصادم این پیوندها ایجاد می‌شود که همان‌طور که در بخش سوم توضیح داده شد، شامل دو نوع یال قوی و یال ضعیف است. برای ایجاد این گراف تصادم تنها یال‌هایی که بار ترافیکی که از آن‌ها عبور می‌کند بزرگ‌تر از صفر باشد، در نظر گرفته خواهند شد. سپس الگوریتم ALSM در سه مرحله اجرا خواهد شد. شبه‌کد الگوریتم در شکل (۷) نشان داده شده است.

- مرحله اول: همگی اتصال‌ها به‌عنوان اتصال‌های قوی در نظر گرفته می‌شوند. راس‌ها توسط الگوریتم کلونی مورچگان رنگ‌آمیزی و سپس پیوندها در شکاف‌های زمانی قرار داده می‌شوند.

- مرحله دوم: به صورت حریصانه راس‌هایی که با اتصال‌های ضعیف به یکدیگر وصل هستند و امکان هم‌رنگ شدن آن‌ها وجود دارد، هم‌رنگ خواهند شد. یکسان‌سازی رنگ‌ها در صورتی انجام می‌شود که بتوان آنتنی برای رفع تداخل اختصاص داد. راس‌هایی که اتصال‌های ضعیف دارند به ترتیب درجه از کمتر به بیشتر مرتب می‌شوند. ابتدا رأسی که کمترین درجه را دارد انتخاب می‌شود. سپس به ترتیب از میان رنگ‌های ممکن، رنگی که تداخلی با رنگ‌های دیگر ندارد انتخاب شده و یکسان‌سازی صورت می‌گیرد. در صورتی که بیش از یک رنگ وجود داشته باشد، رنگی که بیشترین تعداد راس‌ها با آن رنگ شده، انتخاب می‌شود. برای درک بهتر الگوریتم ارائه شده، در ادامه یک مثال از اجرای الگوریتم نشان داده شده است.

```

Procedure ANTCOL
 $t_{ij} = 1 \forall i, j = 1, |V|, i \neq j$  (Initialize trail matrix)

for cycle=1, ncycles
 $\delta_{ij} = 0 \forall i, j = 1, |V|, i \neq j$  (Initialize trail update matrix)
for ant=1, nants
X=V;
K=0;
while X  $\neq \emptyset$  do
k = k+1;
 $C_k = \emptyset$ ; (Initialize color class k)
F = X; (Initialize set of vertices still feasible for color k)
Select i  $\in F$  with probability  $1/|F|$ ;
Call COLOUR_VERTEX(i,k);
While F  $\neq \emptyset$  do
Select i  $\in F$  with probability  $P_{ik}$ ;
Call COLOUR_VERTEX(i,k);
End While
End while
 $\delta_{ij} = \delta_{ij} + 1/k \forall i, j; C_i = C_j, i \neq j$ ; (Update trail update matrix)
next ant
 $t_{ij} = \rho t_{ij} + \delta_{ij} \forall i, j = 1, |V|, i \neq j$ ; (Update trail matrix)
Next cycle

Procedure COLOUR_VERTEX(i,k)
X = X \ {i}
 $C_k = C_k \cup \{i\}$ 
F = F \ ( $\Gamma_{F(i)} \cup \{i\}$ ) (Where  $\Gamma_{F(i)}$  denotes the set of I's neighbors in F)
    
```

شکل (۶): شبه‌کد الگوریتم کلونی مورچگان برای حل مسئله رنگ‌آمیزی گراف [۳۲]

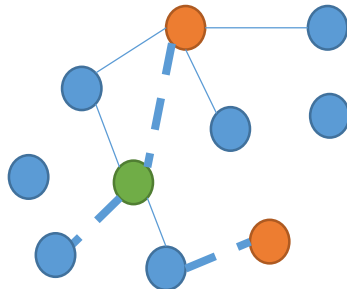
Figure (6): Pseudo code of ant colony for graph coloring [32]

1. Path=Find_Routing_Path(Mesh Network, Traffic) #A set of links for passing the traffic
2. G=Construct_Graph(Path)
3. Colors=Ant_Colony_Coloring(G)
4. Time_Slots=Assign_Links_to_Slots(Colors, Path)
5. DOF(G, Time_Slots) #Assigns antenna for transmitting, receiving and interference cancellation

شکل (۷): شبه‌کد الگوریتم کلونی مورچه‌ها برای زمان‌بندی پیوند در شبکه‌های توری بی‌سیم

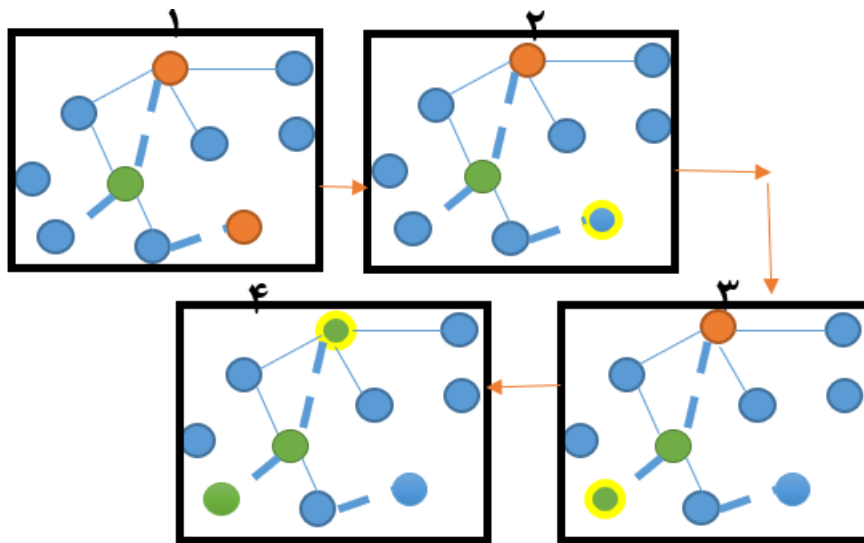
Figure (7): Pseudo code of ALSM algorithm

همان‌طور که در شکل (۸) مشاهده می‌شود ابتدا با استفاده از الگوریتم کلونی مورچگان و با فرض اینکه کلیه اتصال‌ها قوی هستند، گراف رنگ‌آمیزی می‌شود که حاصل آن رنگ‌آمیزی با استفاده از سه رنگ آبی، قرمز و نارنجی است که به سه شکاف زمانی نیاز دارد. سپس راس‌هایی که دارای اتصال‌های ضعیف هستند در نظر گرفته می‌شود و راس‌ها ابتدا بررسی می‌شوند که درجه پایین‌تری دارند. در شکل (۹) یک حلقه زرد رنگ دور رأسی که برای هم‌رنگ شدن بررسی شده، قرار داده شده است. در این مثال فرض شده که برای حذف تداخل کلیه اتصال‌های ضعیف، آنتن وجود دارد. در پایان گراف با استفاده از دو رنگ آبی و نارنجی رنگ‌آمیزی شده است که در نتیجه به دو شکاف زمانی نیاز دارد.



شکل (۸): مثالی از اجرای مرحله اول الگوریتم ارائه شده بر روی گراف تصادم

Figure (8): An example of running the first stage of the proposed algorithm on the interference graph



شکل (۹): مثالی از اجرای مرحله دوم الگوریتم ارائه شده بر روی گراف تصادم
Figure (9): An example of running the second stage of the proposed algorithm on the interference graph

- مرحله سوم: در این مرحله برای هر گره آنتن‌هایی که باید برای ارسال، دریافت و حذف تداخل اختصاص داده شود، مشخص می‌شوند. برای این مرحله از الگوریتم ارائه شده در مرجع [۳۱] استفاده شده است. پیچیدگی محاسباتی الگوریتم ارائه شده به صورت زیر است:

$$O(nants \times ncycles \times nlinks) \quad (۵)$$

که در آن تعداد مورچه‌های مورد استفاده، $ncycles$ تعداد دفعات اجرای الگوریتم کلونی مورچگان و $nlinks$ تعداد پیوندهای انتخاب شده توسط الگوریتم مسیریابی برای انتقال ترافیک است. همان‌طور که در شکل (۶) مشاهده می‌شود الگوریتم یک حلقه اصلی دارد که به تعداد $ncycles$ تکرار می‌شود. در این حلقه یک زیرحلقه وجود دارد که به تعداد مورچه‌ها $nants$ تکرار شده و هر مورچه روی کلیه راس‌های گراف که به تعداد پیوندها هستند حرکت کرده و به راس‌ها رنگ اختصاص می‌دهد. به همین دلیل پیچیدگی محاسباتی الگوریتم را می‌توان حاصل ضرب این سه متغیر در نظر گرفت.

۵- تحلیل و شبیه‌سازی

در این بخش کارایی الگوریتم پیشنهادی مورد مقایسه و ارزیابی قرار گرفته است. ابتدا پارامترهای مورد استفاده در شبیه‌سازی توضیح داده شده و سپس نتایج حاصل از ارزیابی شرح داده شده است.

۵-۱- پارامترهای شبیه‌سازی

برای شبیه‌سازی از نرم‌افزار NS2 استفاده شده است. کلیه مسیریاب‌ها در یک مساحت با ابعاد ۳۰۰ در ۳۰۰ یا ۵۰۰ در ۵۰۰ مترمربع بسته به آزمایش به صورت تصادفی پخش شدند. تعداد گره‌ها ۳۰ یا ۵۰ گره در نظر گرفته شد. دامنه ارسال هر گره ۱۰۰ یا ۱۵۰ متر در نظر گرفته شد. دو گره‌ای که در دامنه ارسال یکدیگر قرار گرفته باشند، به عنوان گره‌های همسایه در نظر گرفته شدند. هر گره برای هر کدام از همسایه‌ها یک آنتن مجزا دارد و همه گره‌ها در یک فرکانس عمل می‌کنند. کلیه تقاضاهای ترافیکی به صورت تصادفی تولید شده و فرض می‌شود که هر تقاضای ترافیکی به یک شکاف زمانی برای انتقال نیاز دارد. برای مسیریابی بسته‌ها از مسیریابی مسیر جداگانه دوگانه^{۳۱} استفاده شد. در آزمایشات صورت گرفته تاثیر روش زمان‌بندی ارائه شده بر روی طول ابرفریم مورد بررسی قرار گرفت. هر چقدر که طول ابرفریم برای انتقال ترافیک کوتاه‌تر باشد، الگوریتم زمان‌بندی بهتر عمل کرده است. همچنین برای تولید تقاضاهای ترافیکی از مدل احتمالاتی پواسن استفاده شد. پارامترهای کلونی مورچگان به صورت جدول (۱) و بر اساس مقادیر پیشنهادی در مرجع [۳۲] تنظیم شده‌اند. این دو پارامتر مقادیر تجربی هستند و با توجه به مسئله باید با سعی و خطا مقادیر مناسب را مشخص نمود. در طی اجرای الگوریتم هر مورچه به صورت احتمالاتی یک رنگ

خاص را به یک رأس اختصاص می‌دهد که مقادیر دو پارامتر α و β تعیین می‌کنند که برای انتخاب رنگ به چه میزان به تجربه قبلی مورچه‌ها (میزان فرمون) و میزان شایستگی آن رنگ توجه داشته باشد. مقادیر این دو پارامتر در اجرای درست الگوریتم و پیدا کردن جواب بهینه تاثیرگذار است. به عنوان مثال اگر پارامتر α بزرگ و β کوچک در نظر گرفته شوند، الگوریتم در همان تکرارهای ابتدایی در بهینه محلی گیر می‌کند و به رنگ‌آمیزی درستی از گراف دست پیدا نمی‌کند.

۲-۵- تحلیل نتایج

در این قسمت نتایج حاصل از شبیه‌سازی آمده است. برای هر الگوریتم شبیه‌سازی ۱۰ بار تکرار شده و میانگین طول ابرفریم در نظر گرفته شد. برای مقایسه الگوریتم ALSM، پنج الگوریتم دیگر مرجع [۱۰] در نظر گرفته شد که در ادامه هر کدام شرح داده شده است.

- الگوریتم چندورودی-چندخروجی^{۳۲}: این الگوریتم به عنوان ورودی گراف $A, G(V, E)$ و W را دریافت می‌کند. ماتریس A شامل آنتن‌های هر گره و W وزن پیوندهاست. این الگوریتم در هر شکاف زمانی گره‌ها را به دو مجموعه $S1$ و $S2$ تقسیم می‌کند. گره‌های مجموعه $S2$ در شکاف زمانی k ام به گره‌های مجموعه $S1$ عملیات ارسال را انجام می‌دهند. سپس بر اساس وزن پیوندها و تداخل میان آن‌ها و اینکه آیا می‌توان با اختصاص آنتن تداخل میان آن‌ها را برطرف کرد یا نه، فعال بودن یا فعال نبودن پیوند در شکاف زمانی مشخص می‌شود.

- وزن‌دهی به پیوند-آرایکس‌آی‌سی^{۳۳}: از پیوندی که بیشترین وزن را دارد شروع کرده و برای حذف تداخل از آنتن‌های سمت گیرنده استفاده می‌کند.

- کانفلیکت‌جی-آرایکس‌آی‌سی^{۳۴}: یک گراف تصادم از روی شبکه ایجاد کرده که در آن رئوس متناظر با پیوندها هستند و در صورتی که دو پیوند با یکدیگر تداخل داشته باشند، میان رئوس متناظر آن‌ها یک یال قرار داده می‌شود. برای حذف تداخل نیز از آنتن‌های سمت گیرنده استفاده می‌شود.

- وزن‌دهی به پیوند-هر دو آی‌سی^{۳۵}: زمان‌بندی پیوندها بر اساس وزن آن‌ها صورت می‌گیرد و پیوندهایی که وزن بالاتری دارند در الویت قرار دارند. حذف تداخل هم در فرستنده و هم در گیرنده صورت می‌گیرد.

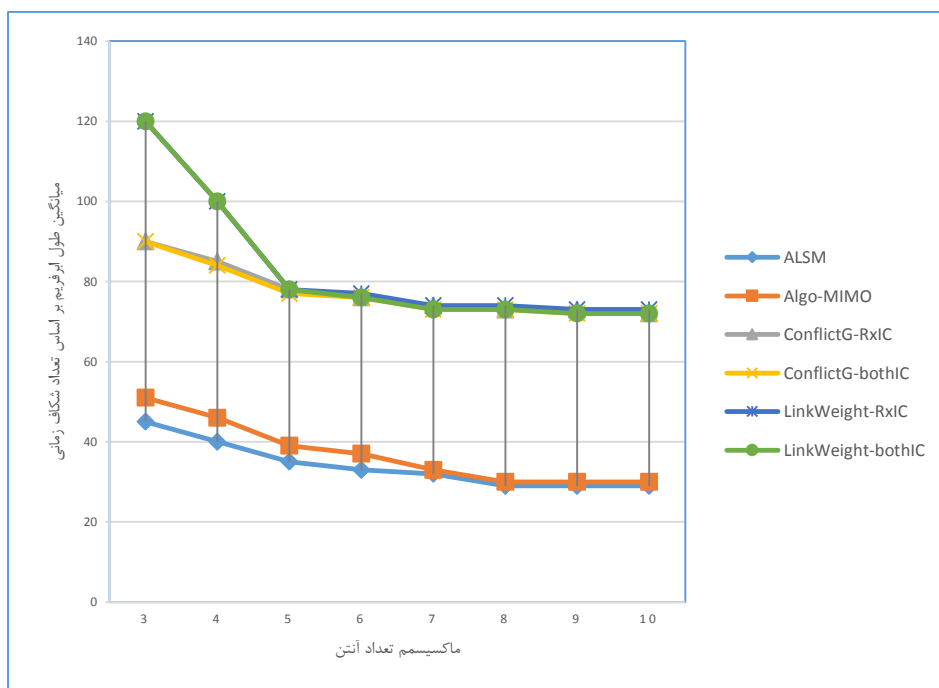
- وزن‌دهی به پیوند-هر دو آی‌سی^{۳۶}: یک گراف تصادم از روی شبکه ایجاد کرده که در آن رئوس متناظر با پیوندها هستند و در صورتی که دو پیوند با یکدیگر تداخل داشته باشند، میان رئوس متناظر آن‌ها یک یال قرار داده می‌شود. برای حذف تداخل نیز هم از آنتن‌های سمت فرستنده و هم از گیرنده استفاده می‌شود.

همان‌طور که در نمودار شکل (۱۰) مشاهده می‌شود، ALSM نسبت به سایر الگوریتم‌ها کارایی بالاتری دارد و با طول ابرفریم کوتاه‌تر قادر است زمان‌بندی پیوند را انجام دهد. با توجه به این نمودار، هر قدر که تعداد آنتن‌های گره‌ها بالاتر در نظر گرفته شود، می‌توان با ابرفریم‌های کوتاه‌تری عمل زمان‌بندی پیوند را انجام داد. در Algo-MIMO و ALSM به دلیل در نظر گرفتن ترتیب برای گره‌ها به صورت بهینه‌تری عملیات اختصاص آنتن برای حذف تداخل صورت می‌گیرد و هدر رفتی برای آنتن وجود ندارد.

Table (1): Parameters Value of ant colony algorithm

جدول (۱): مقادیر پارامترهای الگوریتم کلونی مورچگان

پارامتر	مقدار
تعداد مورچه‌ها	۱۰
تعداد دفعات تکرار الگوریتم	۱۰۰
A	۲
β	۵
ρ	۰/۷۵



شکل (۱۰): مقایسه الگوریتم ALSM نسبت به سایر الگوریتم‌ها برای زمان‌بندی پیوند بر اساس میانگین طول ابرفریم (شکاف زمانی)
 Figure (10): Comparison of ALSM with other algorithms for link scheduling based on average super frame length (slot)

به همین دلیل الگوریتم ALSM و Algo-MIMO نسبت به سایر الگوریتم‌ها عملکرد بهتری دارند. در الگوریتم ALSM با استفاده از الگوریتم کلونی مورچگان و رنگ‌آمیزی گراف با حداقل تعداد رنگ استفاده بهینه‌تری از هر شکاف زمانی می‌کند و می‌تواند پیوندهای بیشتری را به شکاف‌های زمانی اختصاص داده و با طول ابرفریم کوتاه‌تری عمل زمان‌بندی پیوند را انجام دهد.

۶- نتیجه‌گیری

در این مقاله الگوریتمی با نام ALSM برای زمان‌بندی پیوند در شبکه توری بی‌سیم چندرودی-چندخروجی ارائه شد. این الگوریتم مسئله زمان‌بندی پیوند را به مسئله رنگ‌آمیزی گراف با دو نوع یال که نشان‌دهنده تداخل ضعیف و قوی میان پیوندهاست، تبدیل کرده و از الگوریتم کلونی مورچگان برای حل آن استفاده می‌کند. نتایج حاصل از شبیه‌سازی نشان داد که این الگوریتم نسبت به الگوریتم‌های مشابه‌ای که در سال‌های اخیر ارائه شده‌اند، به‌طور میانگین با طول ابرفریم کوتاه‌تری می‌تواند زمان‌بندی پیوند را انجام دهد. به عبارت دیگر می‌تواند ترافیک ورودی را در بازه زمانی کمتری به مقصد ارسال کند.

References

مراجع

- [1] F. Aghaei, A. Avokh, "MRCSC: A cross-layer algorithm for joint multicast routing, channel selection, scheduling, and call admission control in multi-cell multi-channel multi-radio cognitive radio wireless networks", *Pervasive and Mobile Computing*, vol. 64, Article Number: 101150, April 2020 (doi: 10.1016/j.pmcj.2020.101150).
- [2] A. Avokh, G. Mirjalily, "Performance analysis of broadcasting in small-scale multi-radio multi-channel wireless mesh networks", *Proceeding of the IEEE/ICACT*, pp. 537-542, PyeongChang, Korea (South), Feb 2012.
- [3] Y. Chai, X.J. Zeng, "A multi-objective dyna-Q based routing in wireless mesh network", *Applied Soft Computing*, vol. 108, Article Number: 107486, Sept. 2021 (doi: 10.1016/j.asoc.2021.107486).
- [4] R. Vijayanand, D. Devaraj, "A novel feature selection method using whale optimization algorithm and genetic operators for intrusion detection system in wireless mesh network", *IEEE Access*, vol. 8, pp. 56847-56854, March 2020 (doi: 10.1109/ACCESS.2020.2978035).

- [5] X. Jiang, H. Zhang, E.A.B. Yi, N. Raghunathan, C. Mousoulis, S. Chaterji, S. Bagchi, "Hybrid low-power wide-area mesh network for iot applications", *IEEE Internet of Things Journal*, vol. 8, no. 2, pp. 901-915, Jan. 2021 (doi: 10.1109/JIOT.2020.3009228).
- [6] X. Feng, J. Qian, "Architecture of wireless multimedia mesh network nodes for longwall coal mine automation", *Proceeding of the IEEE/ICIC*, pp. 42-45, Wuxi, China, June 2010 (doi: 10.1109/ICIC.2010.104).
- [7] A. Avokh, G. Mirjalily, J. Abouei, S. Valaee, "On the relationship between multicast/broadcast throughput and resource utilizations in wireless mesh networks", *The Scientific World Journal*, vol. 2013, Article Number: 794549, Nov. 2013 (doi: 10.1155/2013/794549).
- [8] B. Mumey, J. Tang, T. Hahn, "Joint stream control and scheduling in multihop wireless networks with MIMO links", *Proceeding of the IEEE /ICC*, pp. 2921-2925, Xiamen, China, May 2008 (doi: 10.1109/ICC.2008.550).
- [9] B. Mumey, J. Tang, T. Hahn, "Algorithmic aspects of communications in multihop wireless networks with MIMO links", *Proceeding of the IEEE /ICC*, pp. 1-6, Cape Town, South Africa, May 2010 (doi: 10.1109/ICC.2010.5502358).
- [10] L. Wabg, "Link scheduling in multi-transmit-receive wireless mesh networks", PhD Thesis, University of Wollongong, July 2015.
- [11] M.lee, G.Yu, G. Ye Li, "Graph embedding-based wireless link scheduling with few training samples", *IEEE Trans. on Wireless Communications*, vol. 20, no. 4, pp. 2282-2294, April 2020 (doi: 10.1109/TWC.2020.30-40983).
- [12] V. Gabale, B. Raman, P. Dutta, S. Kalyanraman, "A classification framework for scheduling algorithms in wireless mesh networks", *IEEE Communications Surveys and Tutorials*, vol. 15, no. 1, pp. 199-222, 2013 (doi: 10.1109/SURV.2012.022412.00068).
- [13] D. M Blough, G. Resta, P. Santi, R. Srinivasan, L. M. Cortes-Pena, "Optimal one-shot scheduling for MIMO networks", *Proceeding of the IEEE/SECON*, pp. 404-412, Salt Lake City, UT, USA, June 2011 (doi: 10.1109/SAHCN.2011.5984924).
- [14] M. Dorigo, M. Birattari, T. Stutzle, "Ant colony optimization", *IEEE Computational Intelligence Magazine*, vol. 1, no. 4, pp. 28-39, Nov. 2006 (doi: 10.1109/MCI.2006.329691).
- [15] R. Ramamoorthy, M. Thangavelu, "An enhanced hybrid ant colony optimization routing protocol for vehicular ad-hoc networks", *Journal of Ambient Intelligence and Humanized Computing*, vol. 13, no.8, pp.3837-3868, April 2021 (doi: 10.1007/s12652-021-03176-y).
- [16] Y. Wang, J. Chen, W. Ning, H. Yu, S. Lin, Z. Wang, C. Chen, "A time-sensitive network scheduling algorithm based on improved ant colony optimization", *Alexandria Engineering Journal*, vol. 60, no. 1, pp. 107-114, Feb. 2021 (doi: 10.1016/j.aej.2020.06.013).
- [17] T. WANG, Z. Mi, "Design of intelligent building scheduling system for internet of things and cloud computing", *Scalable Computing: Practice and Experience*, vol. 22, no. 2, pp. 183-192, Oct 2021 (doi: 10.12694/scpe.v22i2.1883).
- [18] P. Capanera, L. Lenzini, A. Lori, G. Stea, G. Vaglini, "Link scheduling with end-to-end delay constraints in wireless mesh networks", *Proceeding of the WoWMoM*, pp. 1-9, Kos Island, Greece, June 2009 (doi: 10.1109/WOWMOM.2009.5282472).
- [19] C. Shepard, H. Yu, L. Zhong, "ArgosV2: A flexible many-antenna research platform", *Proceedings of the MOBICOM*, pp. 163-166, Miami, USA, Sept. 2013 (doi: 10.1145/2500423.2505302).
- [20] X. Zhanyuan; C. Wei, "A joint channel and queue aware scheduling method for multi-user massive MIMO systems", *Proceeding of the IEEE/ICC*, pp. 1-6, Shanghai, China, May 2019 (doi: 10.1109/ICC.2019.876-1587).
- [21] K. Sundaresan, M. A. Ingram, "Medium access control in ad hoc networks with MIMO links: Optimization considerations and algorithms", *IEEE Trans. on Mobile Computing*, vol. 3, no. 4, pp. 350-365, Oct 2004 (doi: 10.1109/TMC.2004.42).
- [22] L. Badia, A. Botta, L. Lenzini, "A genetic approach to joint routing and link scheduling for wireless mesh networks", *Ad Hoc Networks*, vol. 7, no. 4, pp. 654-664, June 2009 (doi:10.1016/j.adhoc.2008.04.005).
- [23] X. Deng, J. Luo, L. He, Q. Liu, X. Li, L. Cai, "Cooperative channel allocation and scheduling in multi-interface wireless mesh networks", *Peer-to-peer Networking and Applications*, vol. 12, no. 1, pp. 1-12, Nov 2017 (doi:10.1007/s12083-017-0619-8).
- [24] B. Gurashish, D. Blough, P. Santi, "Computationally efficient scheduling with the physical interference model for throughput improvement in wireless mesh networks", *Proceedings of the AICMCN*, pp. 2-13, Los Angeles CA USA, Sep 2006 (doi: 10.1145/1161089.1161092).
- [25] R. Shu, H. Yi, L. Liu, D. Liu, "A queue-length and collision-risk-prediction based scheduling for wireless mesh networks", *Proceeding of the IEEE/ICTC*, pp. 70-74, Nanjing, China, May 2020 (doi: 10.1109/ICTC49-638.2020.9123263).

- [26] X. Li, X. Yu, T. Sun, J. Guo, J. Zhang, “Joint Scheduling and Deep Learning-Based Beamforming for FD-MIMO Systems Over Correlated Rician Fading”, *IEEE Access*, vol. 7, pp. 118297– 118309, Aug 2019 (doi: 10.1109/ACCESS.2019.2936880).
- [27] Y. Ren, K.W. Chin, S. Soh, “A novel degree of freedom (DoF) link scheduler for full-duplex wireless local area networks”, *IEEE Networking Letters*, vol. 2, no. 2, pp. 58-61, March 2020 (doi: 10.1109/LNET.2020.29-83754).
- [28] G.I. Ricardo, J.D. Rezende, V.C. Barbosa, “Scheduling wireless links in the physical interference model by fractional edge coloring”, *IEEE Wireless Communications Letters*, vol. 9, pp. 528-532, Dec 2019 (doi: 10.1109/LWC.2019.2961361).
- [29] W. Cui, K. Shen, W. Yu, “Spatial deep learning for wireless scheduling”, *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*, vol. 37, no. 6, pp. 1248-1261, March 2019 (doi: 10.1109/JSAC.2019.2904352)
- [30] H. Fawaz, M.E. Helou, S. Lahoud, K. Khawam, “A reinforcement learning approach to queue-aware scheduling in full-duplex wireless networks”, *Computer Networks*, vol. 189, Article Number: 107893, April 2021 (doi: 10.1016/j.comnet.2021.107893).
- [31] Y. Shi, J. Liu, C. Jiang, C. Gao, Y. T. Hou, “An optimal link layer model for multi-hop MIMO networks”, In: 2011 Proceedings IEEE INFOCOM. IEEE, pp. 1916-1924, Shanghai, China, April 2011 (doi: 10.1109/LWC.2019.2961361).
- [32] K.A. Downsland, J.M. Thompson, “An improved ant colony optimization heuristic for graph colouring”, *Discrete Applied Mathematics*, vol. 156, no. 3, pp. 313-324, Feb 2008 (doi: 10.1016/j.dam.2007.03.025).
- [33] J. Wu, D. Lin, G. Li, Y. Liu, Y. Yin, “Distributed link scheduling algorithm based on successive interference cancellation in MIMO wireless networks”, *Wireless Communications and Mobile Computing*, vol. 2019, Article Number: 9083282, June 2019 (doi: 10.1155/2019/9083282).
- [34] L.M. Cortés-Pena, D.M. Blough, “MIMO link scheduling for interference suppression in dense wireless networks”, *Proceeding of the IEEE/WCNC*, pp. 1225-1230, New Orleans, LA, USA, March 2015 (doi: 10.1109/WCNC.2015.7127644).

زیر نویس‌ها

- | | |
|--|--------------------------------------|
| 1. Wireless mesh network | 18. Interference graph |
| 2. Self-configuration | 19. Stream-controlled medium access |
| 3. Self-organization | 20. Load balance link layer protocol |
| 4. Internet of things | 21. Greedy algorithm |
| 5. Ad-hoc | 22. Weight computation |
| 6. Routers | 23. Argos |
| 7. Client | 24. Warp |
| 8. Gateway | 25. End to end delay |
| 9. WiMAX | 26. No mix transmit and receive |
| 10. Multiple transfer/receive | 27. Strong edge |
| 11. No mix-tx-rx | 28. Weak edge |
| 12. Flat-top | 29. Number of ants |
| 13. Multiple input multiple output | 30. Number of cycles |
| 14. Minimum mean squared error sequential interference cancellation (MMSE-SIC) | 31. Dual separate path |
| 15. Time division multiple access | 32. Algo-MIMO |
| 16. Ant colony for link scheduling in mesh networks | 33. LinkWeight-RxIC |
| 17. Ant colony algorithm | 34. ConflictG-RxIC |
| | 35. LinkWeight-bothIC |
| | 36. ConflictG-bothIC |