

## اثر آنتن‌های جهت‌دار بر میزان تداخل شبکه‌های توری بی‌سیم در مسیریابی ترافیک -

### های چندپخشی

زینب عسکری<sup>۱</sup>، آوید آوخ<sup>۲</sup> و سید محمود دانشور فرزائگان<sup>۳</sup>

<sup>۱</sup>دانشکده مهندسی برق، واحد نجف‌آباد، دانشگاه آزاد اسلامی، نجف‌آباد، اصفهان، ایران، zeinabaskari92@sel.iaun.ac.ir

<sup>۲</sup>دانشکده مهندسی برق، واحد نجف‌آباد، دانشگاه آزاد اسلامی، نجف‌آباد، اصفهان، ایران، aavokh@pel.iaun.ac.ir

<sup>۳</sup>دانشکده مهندسی برق، واحد نجف‌آباد، دانشگاه آزاد اسلامی، نجف‌آباد، اصفهان، ایران، M\_daneshvar@pel.iaun.ac.ir

چکیده - این مقاله به بررسی میزان تداخل ایجاد شده روی درخت‌های چندپخشی برای دو حالتی که گره‌های شبکه مجهز به آنتن‌های جهت‌دار و همه‌جهته باشند می‌پردازد. بستر آزمایش این مقایسه شبکه‌های توری بی‌سیم چند کاناله چند رادیویی است، که در آن هر یک از گره‌ها مجهز به چند رادیو است که روی کانال‌های مجزا تنظیم شده‌اند. هدف از بررسی مذکور، استفاده هرچه بهتر از منابع رادیویی و افزایش ظرفیت شبکه در مسیریابی ترافیک‌های چندپخشی است. برای نیل به این هدف، با مجهز کردن گره‌های شبکه به آنتن‌های جهت‌دار تداخل به میزان قابل توجهی نسبت به آنتن‌های همه‌جهته کاهش می‌یابد و این موضوع خود باعث کاهش منابع مصرفی شبکه می‌گردد. همچنین، نشان داده خواهد شد در شرایطی که جهت ارسال و دریافت بسته‌های داده در آنتن‌های جهت‌دار به صورت تصادفی انتخاب می‌شود، میزان تداخل برای حالتی که گره‌های گیرنده و فرستنده هر دو به آنتن‌های جهت‌دار مجهز هستند بیشتر از حالتی است که فقط گره‌های فرستنده دارای آنتن‌های جهت‌دار هستند.

کلید واژه - شبکه‌های توری بی‌سیم چند رادیویی چند کاناله، آنتن جهت‌دار، آنتن همه‌جهته

مذکور از بین برود. در این صورت گره فرستنده باید بسته مورد نظر را دوباره ارسال کند که این موضوع، خود عاملی برای به هدر رفتن منابع رادیویی و در نتیجه کاهش ظرفیت شبکه است. همچنین، در حالتی که ترافیک موجود در شبکه از نوع ترافیک-های چندپخشی باشد، اثر این مشکل بر میزان گذردهی شبکه دوچندان خواهد شد. زیرا در این نوع ترافیک لازم است تا بسته-های داده از یک منبع خاص به صورت هم‌زمان برای مجموعه‌ای از کاربران ارسال گردد.

اخیراً، با ظهور فن‌آوری آنتن‌های جهت‌دار، استفاده از آن‌ها جهت بهبود قابلیت اجرایی شبکه‌های بی‌سیم، بسیار مورد توجه قرار گرفته است [۳] - [۶]. نویسندگان در این پژوهش‌ها دریافته‌اند که در مدل‌های مختلف شبکه‌های بی‌سیم، با تجهیز گره‌ها به آنتن‌های جهت‌دار می‌توان به ظرفیت بیش‌تری در مقایسه با آنتن‌های همه‌جهته دست یافت. همچنین، در این مراجع نشان داده شده که با کاهش پهنای لوب اصلی آنتن‌های جهت‌دار، ظرفیت شبکه رو به افزایش می‌گذارد. این تحقیقات نشان داده است که تجهیز گره‌ها به این آنتن‌ها می‌تواند تداخل فرکانسی را به میزان قابل توجهی کاهش دهد. برخلاف آنتن‌های

### ۱- مقدمه

شبکه‌های توری بی‌سیم گونه‌ای از شبکه‌های چندپخشی هستند که به‌عنوان راهکاری امن و ارزان برای طیف وسیعی از کاربردهای مخابرات بی‌سیم، مورد توجه کارشناسان امر قرار گرفته‌اند [۱] و [۲]. این شبکه‌ها از سه دسته گره به نام‌های مشتری‌های توری، مسیریاب‌های توری و گره‌های دروازه تشکیل می‌شوند. به غیر از گره‌های مشتری که می‌توانند ثابت یا متحرک باشند، بقیه گره‌های ثابت بوده و هیچ‌گونه محدودیتی در مصرف انرژی ندارند. همچنین، در بین این سه، فقط گره‌های دروازه هستند که به صورت مستقیم به شبکه‌های سیمی مانند اینترنت متصل می‌شوند.

یکی از مشکلات موجود در شبکه‌های توری بی‌سیم، محدودیت ظرفیت شبکه به دلیل وجود تداخل بین پیوندهای بی-سیم داخل شبکه است. زمانی که یک فرستنده بسته داده‌یی را برای گیرنده خود ارسال می‌کند به علت هم‌زمانی این ارسال با ارسال‌های دیگر، ممکن است تصادم رخ دهد و اطلاعات ارسال

الگوریتم WCTB [۱۰] برای ساخت درخت‌های مسیریابی چندپخشی در سه حالت ۱- آنتن گره‌های فرستنده و گیرنده هردو همه‌جهته، ۲- آنتن گره‌های فرستنده جهت‌دار و آنتن گره‌های گیرنده همه‌جهته و ۳- آنتن گره‌های فرستنده و گیرنده هردو جهت‌دار، استفاده خواهد شد. این مقایسه نشان می‌دهد که با مجهز کردن گره‌های شبکه به آنتن‌های جهت‌دار، مقدار تداخل نسبت به آنتن‌های همه‌جهته کاهش چشمگیری پیدا می‌کند. همچنین، در صورتی که بیم ارسال و دریافت آنتن‌های جهت‌دار به‌طور تصادفی انتخاب شود، در حالت ۲ که فقط گره‌های فرستنده به آنتن جهت‌دار مجهز هستند تداخل به میزان قابل توجهی نسبت به حالت ۱ کاهش می‌یابد. اما زمانی که گره‌های گیرنده نیز به آنتن‌های جهت‌دار مجهز می‌گردد، تداخل نسبت به حالت ۲ افزایش پیدا می‌کند.

این مقاله، مشتمل بر چندین بخش است. در بخش ۲ مدل مورد استفاده برای شبکه، آنتن‌های جهت‌دار و محاسبه تداخل بین درخت‌های مسیریابی معرفی می‌گردد. در بخش ۳ توضیحاتی در مورد نحوه عملکرد الگوریتم WCTB و تأثیر استفاده از آنتن‌های جهت‌دار بر میزان تداخل ارائه می‌گردد. در بخش ۴ قابلیت آنتن‌ها جهت‌دار در کاهش منابع مصرفی شبکه از طریق بررسی نتایج شبیه‌سازی اثبات خواهد شد. در بخش ۵ نیز به بیان نتیجه به‌دست آمده از بحث حاضر پرداخته می‌شود.

## ۲- مدل و مفروضات شبکه

شبکه توری بی‌سیم مورد استفاده در این مقاله، مشتمل بر  $N$  گره است که به صورت تصادفی در سطحی مربعی توزیع می‌گردند. هر یک از این گره‌ها دارای چند رادیو نیمه دوطرفه هستند که روی کانال‌های مجزا تنظیم شده‌اند. گراف جهت‌دار  $G(V, E)$  گراف متناظر این شبکه است که در آن  $V$  و  $E$  به ترتیب بیان‌گر مجموعه گره‌ها و مجموعه پیوندهای بی‌سیم موجود در شبکه است.

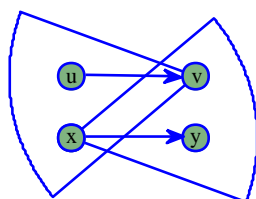
### ۲-۱- مدل آنتن‌های جهت‌دار

گره‌های این شبکه می‌توانند مجهز به آنتن‌های همه‌جهته یا جهت‌دار باشند. در حالتی که گره‌های شبکه مجهز به آنتن‌های جهت‌دار هستند، از مدل ایده‌آل این آنتن‌ها برای نمایش الگوی

همه‌جهته که دارای چگالی توان یکنواخت در همه جهت‌ها هستند [۷]، نحوه طراحی آنتن‌های جهت‌دار به گونه‌ای است که توان ارسالی خود را فقط در لوب اصلی آنتن متمرکز و در لوب‌های فرعی توان بسیار کمی ارسال می‌کنند. از این رو، با تجهیز گره‌ها به آنتن‌های مفروض، تنها گره‌هایی که داخل لوب اصلی آنتن یک گره خاص قرار دارند، باعث ایجاد تداخل برای آن می‌شوند.

از الگوی تشعشعی سوئیچ شونده و الگوی تشعشعی قابل هدایت، می‌توان به‌عنوان دو فن‌آوری کاربردی در آنتن‌های جهت‌دار یاد کرد [۸] و [۹]. در روش اول، برد مخابراتی هر گره به نواحی مختلفی تقسیم می‌شود و هر گره می‌تواند از یک یا چند ناحیه برای انتقال داده‌ها استفاده کند. در روش دوم، هر گره مجهز به چند آنتن است که هر کدام از آن‌ها دارای یک الگوی تشعشعی قابل شکل‌دهی و هدایت هوشمند می‌باشند.

در استفاده از آنتن‌های جهت‌دار، توجه به این نکته حائز اهمیت است که اگرچه آن‌ها با متمرکز کردن توان ارسالی خود در یک زاویه خاص باعث کاهش تداخل در شبکه می‌شوند، اما در مسیریابی ترافیک‌های چندپخشی افزایش تعداد گره‌های ارسال‌کننده را به دنبال خواهند داشت. موضوع مورد بحث به ترتیب بیان‌گر یک مزیت و یک نقصان در کاربرد این آنتن‌ها است. زمانی که برد مخابراتی یک گره به زاویه خاصی محدود می‌شود تعداد گره‌هایی که در این زاویه قرار می‌گیرند کاهش یافته و به دنبال آن مقدار تداخلی که روی گره مفروض ایجاد می‌کنند نیز کاهش می‌یابد. اما از طرف دیگر، این اتفاق افزایش هزینه کل درخت‌های مسیریابی را به همراه دارد. در نتیجه، طراحی شبکه‌هایی که در مصرف منابع رادیویی بهینه هستند، در گرو مدیریت صحیح مصالحه بین دو عامل مذکور است. دشواری این مصالحه در حضور فن‌آوری چند رادیویی چند کاناله دوچندان خواهد شد. یکی دیگر از نکاتی که در مورد آنتن‌های جهت‌دار باید به آن توجه کرد این است که در صورت استفاده نامناسب از آنتن‌های جهت‌دار نه تنها تداخل بین درخت‌های مسیریابی کاهش نمی‌یابد، بلکه باعث افزایش بیش از اندازه تداخل در بین درخت‌ها می‌شود. هدف این مقاله، کاهش تداخل بین درخت‌های مسیریابی چندپخشی و استفاده هرچه بهتر از منابع رادیویی با مجهز کردن گره‌های شبکه به آنتن‌های جهت‌دار است. بدین منظور از



(ج)

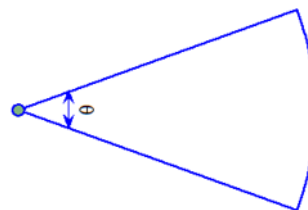
شکل (۲): مدل‌های مختلف محاسبه تداخل

مطابق شکل (۲-الف) در حالت ۱ که تمام آنتن‌ها همه‌جهته هستند، برای متداخل بودن دو پیوند  $(x, y)$  و  $(u, v)$  با فرض تساوی کانال‌ها، تنها لازم است که گره  $y$  یا  $v$  به ترتیب در برد تداخلی گره  $u$  یا  $x$  واقع باشند. برای حالت ۲ که در آن تنها گره‌های فرستنده به آنتن‌ها جهت‌دار مجهز هستند شرط متداخل بودن پیوندها با حالت قبل فرق می‌کند؛ در حالت مذکور زمانی دو پیوند  $(x, y)$  و  $(u, v)$  برای یکدیگر ایجاد تداخل می‌کنند که گره  $y$  یا  $v$  به ترتیب داخل ناحیه بیم تداخلی گره  $u$  یا  $x$  قرار گیرند که این موضوع در شکل (۲-ب) به تصویر کشیده شده است. همچنین، شکل (۲-ج) نشان دهنده مدل تداخل، برای حالت ۳ است. در این حالت چون گره‌های فرستنده و گیرنده هردو مجهز به آنتن‌های جهت‌دار هستند شرط متداخل بودن دو پیوند فرضی  $(x, y)$  و  $(u, v)$  این است که به‌عنوان مثال گره  $v$  در بیم تداخلی گره  $x$  واقع و گره  $x$  نیز در بیم تداخلی آنتن گیرنده گره  $v$  واقع باشد. البته عکس این مسئله نیز صادق است.

### ۳- بیان مسئله

در این مقاله، برای مقایسه میزان تداخل در دو حالت آنتن‌های همه‌جهته و جهت‌دار از الگوریتم WCTB [۱۰] برای ساخت درخت‌های چندپخشی استفاده می‌گردد. در این راستا، الگوریتم مذکور به‌گونه‌ای تعمیم می‌یابد که در آن گره‌ها قابلیت مجهز شدن به آنتن‌های جهت‌دار را داشته باشند. نحوه عملکرد الگوریتم WCTB به این صورت است که در ابتدا، گره  $k$  و مجموعه گره‌های  $M$  به‌عنوان گره منبع و مجموعه گره‌های مقصد درخت مسیریابی چندپخشی انتخاب و سپس وزن تمام پیوندهای بی‌سیم داخل شبکه برابر یک فرض می‌شود. این الگوریتم در هر مرحله، کوتاه‌ترین میسر بین گره  $k$  و یکی از گره‌های عضو مجموعه  $M$  مشخص می‌گردد. پس از تعیین مسیر،

تشعشی آن‌ها استفاده می‌شود. در این مدل مطابق شکل (۱) توان ارسالی آنتن به قطاعی از یک دایره با پهنا  $0 < \theta < 2\pi$  محدود و همچنین، بین تمام نقاط داخل این ناحیه به‌طور یکنواخت توزیع می‌گردد.



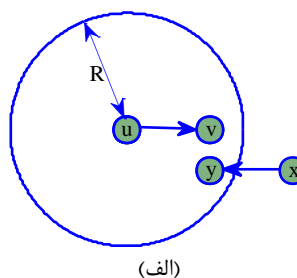
شکل (۱): مدل آنتن جهت‌دار

برد مخابراتی این آنتن‌ها از رابطه (۱) به‌دست می‌آید که در آن  $R(2\pi)$ ،  $\theta$  و  $\alpha$  به ترتیب بیان‌گر برد مخابراتی آنتن همه‌جهته، پهناهای بیم آنتن و ضریب تضعیف مسیر است [۸].

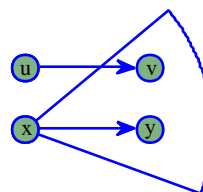
$$R(\theta) = \left(\frac{2\pi}{\theta}\right)^{\frac{1}{\alpha}} R(2\pi). \quad (1)$$

### ۲-۲- مدل تداخل

برای محاسبه تداخل بین پیوندهای بی‌سیم داخل شبکه، از مدل تداخل پروتکلی استفاده می‌شود. براساس این مدل، می‌توان سه مدل تداخلی مختلف برای سه حالت مذکور در بخش مقدمه در نظر گرفت که این مدل‌ها در شکل (۲) نمایش داده می‌شوند.



(الف)



(ب)

مسیریابی می شود ولی در مقابل کاهش تداخل بین درخت های چند پخشی را به دنبال دارد.

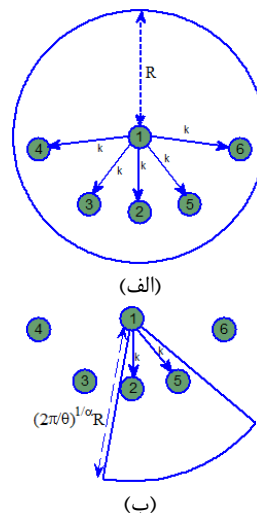
#### ۴- شبیه سازی و نتایج عددی

بستر آزمایش مورد استفاده در این مقایسه، شبکه توری بی-سیم است که گره های آن در یک ناحیه مربعی با ابعاد ۱۰۰۰ متر × ۱۰۰۰ متر، به صورت تصادفی توزیع شده اند. هر یک از گره های شبکه در حالت پیش فرض دارای سه رادیو هستند که روی سه کانال مجزا به طور تصادفی تنظیم می شوند. در حالتی که گره ها مجهز به آنتن های جهت دار هستند، بیم ارسال یا دریافت در آن ها به صورت تصادفی انتخاب می شود. برد مخابراتی برای هر گره در حالت همه جهته ۳۰۰ متر در نظر گرفته می شود و برد مخابراتی برای آنتن های جهت دار نیز، از رابطه (۱) به دست می آید. همچنین، برد تداخلی در هر حالت دو برابر برد مخابراتی آن فرض می شود. تمام شبیه سازی ها روی گراف های پیوسته اجرا می گردد؛ در این صورت، اگر گرافی شرط پیوستگی را دارا نبود پیش از اجرای محاسبات حذف می گردد. هر کدام از نتایج عددی با میانگین گیری روی نتایج ۱۰۰ تکرار از آزمایش به دست می آید. در همه سناریو ها پارامترهای  $N$ ،  $t$ ،  $f$  و  $ch$  به ترتیب نشان دهنده تعداد درخت های چند پخشی، تعداد گره های مقصد، تعداد گره های شبکه و تعداد کانال های قابل استفاده در شبکه است. همچنین، در تمام شبیه سازی ها ضریب تضعیف مسیر برابر ۴ فرض می شود ( $\alpha = 4$ ).

**سناریو اول:** در این سناریو، به مقایسه تغییرات تعداد ارسال ها نسبت به تغییرات تعداد گره های مقصد در الگوریتم WCTB برای سه حالت گفته شده در مقدمه می پردازیم. در این جا، مقادیر پارامترهای  $N$  و  $ch$  را به ترتیب برابر ۳۰، ۳۱ و ۶ قرار می دهیم. سپس، مقدار پارامتر  $t$  را از ۱ تا ۳۰ افزایش داده و نمودار تغییرات تعداد ارسال ها در الگوریتم های مذکور را رسم می کنیم (شکل (۴)). همان طور که انتظار می رفت، با مجهز کردن گره ها به آنتن های جهت دار تعداد متوسط ارسال ها افزایش می یابد؛ دلیل این اتفاق این است که آنتن های جهت دار با متمرکز کردن توان ارسال خود در یک جهت، باعث کاهش تعداد پیوندهای تحت پوشش هر فرستنده در درخت و در نتیجه افزایش هزینه ساخت درخت می گردند. همچنین، می توان

برای هر یک از پیوندهای عضو آن کانالی از بین کانال های قابل دسترس آن پیوند انتخاب می شود و وزن آن پیوند و همچنین، تمام پیوندهایی که تحت پوشش فرستنده پیوند مذکور هستند برابر صفر قرار می گیرد. برای مثال، با توجه به شکل (۳-الف) اگر پیوند (1, 3) یکی از پیوندهای عضو درخت باشد وزن این پیوند و تمام پیوندهای تحت پوشش فرستنده شماره ۱ یعنی پیوندهای (1, 2)، (1, 4)، (1, 5) و (1, 6) برابر صفر در نظر گرفته می شود. این الگوریتم تا جایی ادامه می یابد تا تمام گره های عضو  $M$  توسط درخت مسیریابی پوشش داده شوند.

مطابق شکل (۳) با تجهیز گره ها به آنتن های جهت دار، تعداد گره های همسایه که در بیم ارسال یک فرستنده قرار می گیرند در مقایسه با آنتن های همه جهته کاهش می یابد.

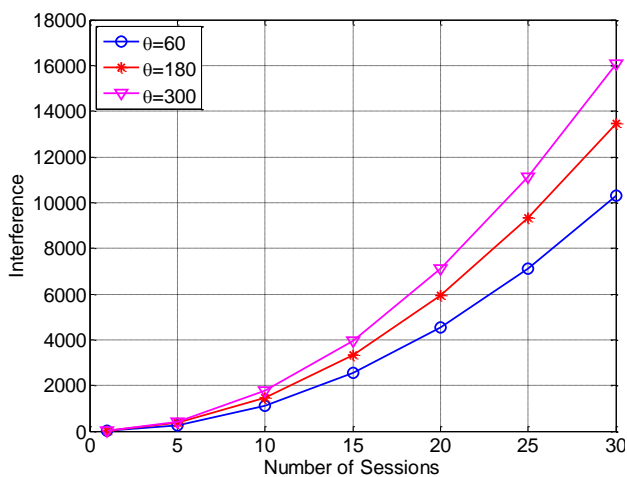


شکل (۳): مقایسه تعداد گره های تحت پوشش (الف) آنتن های همه جهته و (ب) آنتن جهت دار

با توجه به شکل (۳-الف)، زمانی که توان ارسال گره فرستنده به داخل ناحیه لوب اصلی محدود می شود، تعداد گره های تحت پوشش فرستنده در مقایسه با حالت همه جهته (شکل (۳-ب)) کاهش می یابد. این موضوع باعث افزایش تعداد ارسال ها در درخت مسیریابی و در نتیجه افزایش منابع مصرفی شبکه می شود. اما از طرف دیگر این موضوع باعث کاهش تداخلی گره فرستنده می شود. پس می توان نتیجه گرفت که اگرچه استفاده از آنتن های جهت دار باعث افزایش هزینه ساخت درخت

توجیه این مسئله این است که با افزایش تعداد درختها تعداد کل ارسالهای موجود در شبکه افزایش می یابد و در نتیجه مقدار تداخل ایجاد شده توسط این ارسالها روبه افزایش می گذارد. از این نمودار می توان دریافت که استفاده از آنتنهای جهت دار می تواند تداخل نسبت به آنتنهای همه جهته کاهش دهد. مسئله دیگری که باید به آن توجه کرد این است که با توجه به نتایج شکل (۵) میزان تداخل به دست برای حالت ۲ کم تر از حالت ۳ است. علت این موضوع این است که با انتخاب تصادفی بیم ارسال و دریافت در حالت ۳، تعداد ارسالها نسبت به حالت ۲ به میزان زیادی افزایش پیدا می کند و در نتیجه میزان تداخل شبکه در حالت ۳ بیش تر از حالت ۲ می گردد.

**سناریو چهارم:** در این قسمت قصد داریم تا با شبیه سازی مقادیر به دست آمده برای تداخل در الگوریتم WCTB، میزان تغییرات این مقادیر را نسبت به تغییرات پهنای بیم آنتنها مورد بررسی قرار دهیم. مانند سناریوهای قبلی، مقادیر پارامترهای چهارگانه را به ترتیب برابر  $f = 30$ ،  $t = 10$ ،  $N = 31$  و  $ch = 6$  قرار می دهیم. شکل (۶) نمایشگر نتایج به دست آمده از این شبیه سازی است. از مشاهده این نمودارها درمی یابیم که هرچه پهنای لوب اصلی در آنتنها کمتر باشد مقدار تداخل کل هر یک از درختهای چندپخشی کمتر است. این کاهش تداخل باعث می شود که مصرف منابع رادیویی در شبکه بهبود یابد.

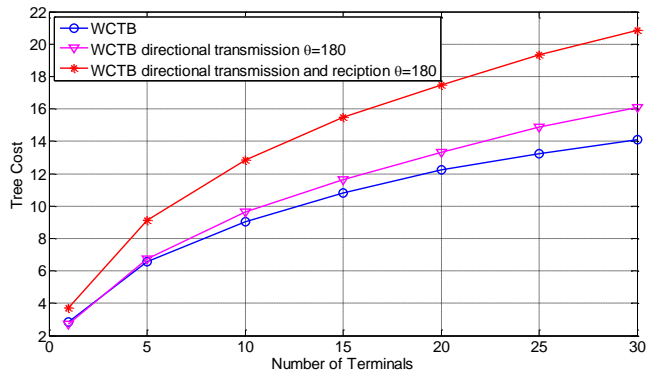


شکل (۶): مقایسه تغییرات مقدار تداخل با تغییر پهنای لوب اصلی آنتن

### ۵- نتیجه گیری

در این مقاله، به بررسی میزان تداخل شبکه های توری بی-

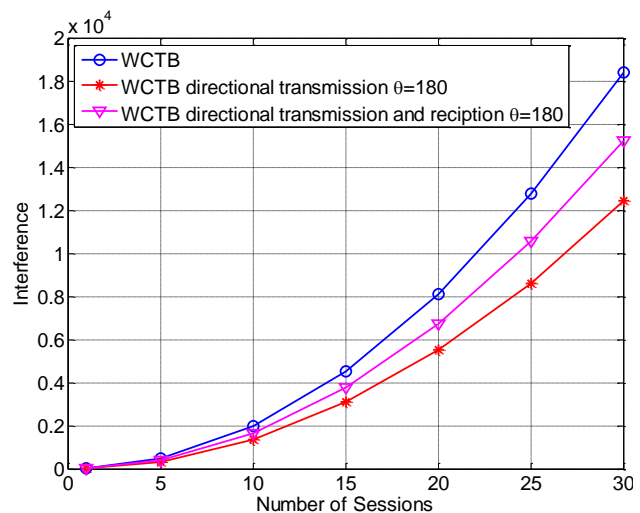
مشاهده که هزینه هر درخت مسیریابی با افزایش  $t$  افزایش پیدا می کند؛ زیرا با افزایش تعداد گره های مقصد درخت مسیریابی بزرگتر شده و در نتیجه تعداد ارسالها در درخت افزایش می یابد.



شکل (۴): نمودار مقایسه تغییرات تعداد ارسالها نسبت به

تعداد گره های مقصد، برای الگوریتم WCTB

**سناریو دوم:** در این سناریو به مقایسه تغییرات مقدار تداخل در الگوریتم WCTB در سه حالت موجود برای آنتنها می پردازیم. در ابتدا، مقادیر پارامترهای چهارگانه به ترتیب برابر  $f = 30$ ،  $t = 10$ ،  $N = 31$  و  $ch = 6$  فرض می شوند. نمودار شکل (۵) نشان می دهد که با افزایش تعداد درختهای مسیریابی در شبکه مقدار تداخل نیز زیاد می شود.



شکل (۵): نمودار مقایسه تغییرات مقدار تداخل در الگوریتم

WCTB

سیم در مسیریابی ترافیک‌های چندپخشی پرداخته شد. در این راستا، با مجهز کردن گره‌های فرستنده در الگوریتم WCTB به آنتن‌های جهت‌دار مقدار تداخل بین درخت‌های چندپخشی به میزان قابل ملاحظه‌ای در مقایسه با آنتن‌های همه‌جهته کاهش یافت. همچنین، نشان داده شد در شرایطی که علاوه بر آنتن‌های فرستنده آنتن‌های گیرنده نیز جهت‌دار هستند، به دلیل انتخاب تصادفی بیم ارسال و دریافت، تعداد ارسال‌ها به مقدار زیادی افزایش پیدا کرد و بنابراین مقدار تداخل شبکه نسبت به حالتی که فقط آنتن‌های فرستنده جهت‌دار بود، بیش‌تر گردید.

## مراجع

- [1] I. F. Akyildiz, X. Wang, and W. Wang, "Wireless mesh networks: a survey", *Computer Networks*, vol. 47, no. 4, pp. 445-487, Mar. 2005.
- [2] P. H. Pathak, and R. Dutta, "A survey of network design problems and joint design approaches in wireless mesh networks", *IEEE Communications Surveys & Tutorials*, vol. 13, no. 3, pp. 396-428, June 2010.
- [3] P. Yeh, W. E. Stark, and S. A. Zummo, "Performance analysis of wireless networks with directional antennas", *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, vol. 57, no. 5, pp. 3187-3199, Sep. 2008.
- [4] P. Li, C. Zhang, and Y. Fang, "The capacity of wireless ad hoc networks using directional antennas", *IEEE Transactions on Mobile Computing*, vol. 10, no. 10, pp. 1374-1387, Oct. 2011.
- [5] G. Zhang, Y. Xu, X. Wang, and M. Guizani, "Capacity of hybrid wireless networks with directional antenna and delay constraint", *IEEE Transactions on Communications*, vol. 58, no. 7, pp. 2097-2106, July 2010.
- [6] J. Zhang, and X. Jia, "Capacity analysis of wireless mesh networks with omni or directional antennas", in *Proc. IEEE INFOCOM*, 2009, pp. 2881-2885.
- [7] C. T. Chang, C. Y. Chang, T. L. Wang, and Y. J. Lu, "Throughput enhancement by exploiting spatial reuse opportunities with smart antenna systems in wireless ad hoc networks", *Computer Networks*, vol. 57, no. 13, pp. 2483-2498, Sep. 2013.
- [8] Y. Chen, J. Liu, X. Jiang, and O. Takahashi, "Throughput analysis in mobile ad hoc networks with directional antennas", *Ad Hoc Networks*, vol. 11, no. 3, pp. 1122-1135, May 2013.
- [9] Y. Chang, Q. Liu, X. Jia, and K. Zhou, "Routing and transmission scheduling for minimizing broadcast delay in multirate wireless mesh networks using directional antennas", *Wireless Communications and Mobile Computing*, vol. 15, no. 1, pp. 87-99, Jan. 2015.
- [10] T. Liu, and W. Liao, "Multicast routing in multi-radio multi-channel wireless mesh networks", *IEEE Transactions on Wireless Communications*, vol. 9, no. 10, pp. 3031-3039, Oct. 2010.