

# مدل سازی کنترل جریان هسته‌های پردازشی در شبکه روی تراشه بی‌سیم

فرهاد راد<sup>۱</sup>    میدیا رشادی<sup>۲</sup>    احمد خادم زاده<sup>۳</sup>

۱- استادیار- گروه مهندسی کامپیوتر، واحد یاسوج، دانشگاه آزاد اسلامی، یاسوج، ایران

[Rad@iauyasooj.ac.ir](mailto:Rad@iauyasooj.ac.ir)

۲- استادیار- دانشکده مهندسی برق و کامپیوتر، واحد علوم و تحقیقات، دانشگاه آزاد اسلامی، تهران، ایران

[Reshadi@srbiau.ac.ir](mailto:Reshadi@srbiau.ac.ir)

۳- دانشیار- مرکز مخابرات ایران، تهران، ایران

**چکیده:** شبکه روی تراشه به عنوان یک راه‌حل موثر برای اتصالات درون تراشه‌ای معرفی شده است. در سال‌های اخیر، با رشد چشمگیر فناوری‌های نیمه-رساناهای سیلیکونی و دستیابی به آنتن‌های نانو-کربنی، استفاده از آنتن‌های بی‌سیم درون تراشه میسر شده است. این ساختار جدید ارتباطی، شبکه روی تراشه بی‌سیم نامیده شده است. با به کارگیری مسیریاب‌های مجهز به آنتن‌های بی‌سیم درون یک تراشه چند هسته‌ای، علاوه بر کاهش فاصله‌ی بین هسته‌های دور از هم، تاخیر و توان مصرفی تراشه نیز به شدت کاهش یافته است. با این وجود، بدلیل تعداد محدود کانال‌های بی‌سیم در یک تراشه و استفاده مشترک همه هسته‌ها از این کانال‌ها، کنترل ازدحام و کنترل جریان در این شبکه‌ها به چالشی مهم تبدیل شده است. در این مقاله مدلسازی ریاضی کنترل نرخ جریان هسته‌های پردازشی در شبکه روی تراشه بی‌سیم مورد بررسی قرار گرفته است. در ابتدا، مساله کنترل نرخ جریان هسته‌ها برای ترافیک‌های بهترین تلاش و گارانتی شده به فرم یک مساله بهینه‌سازی بر پایه تابع سودمندی با در نظر گرفتن محدودیت‌های پهنای باند لینک‌های سیمی/بی‌سیم، نرخ جریان هسته‌های پردازشی و الگوهای مسیریابی فاقد بن بست مدل‌سازی شده است. در ادامه برای رسیدن به یک جواب قابل قبول، مساله اولیه به شکل یک مساله دوگان بدون محدودیت تبدیل شده و با روش تصویرگردان، جواب دوگان مساله بدست آمده است. در نهایت، براساس جواب بهینه بدست آمده الگوریتمی تکرارپذیر برای کنترل نرخ جریان هسته‌های پردازشی درون تراشه پیشنهاد شده است. تحلیل و شبیه سازی عملکرد الگوریتم پیشنهادی تحت الگوهای ترافیکی مصنوعی و الگوریتم‌های مسیریابی فاقد بن بست نشان داده است که الگوریتم پیشنهادی توانسته نرخ جریان ارسال منابع ترافیکی (منبع جریان‌ها) را با همگرایی مناسبی کنترل و تنظیم نماید. همچنین با تسریع در همگرایی نرخ جریان هسته‌ها، توان عملیاتی شبکه بهبود قابل ملاحظه‌ای داشته است.

**واژه‌های کلیدی:** شبکه روی تراشه بی‌سیم، کنترل جریان، بهینه‌سازی، روش تصویر گردان، تابع سودمندی

DOI: 10.52547/jiaeee.19.2.109

تاریخ ارسال مقاله: ۱۳۹۷/۲/۲۹

تاریخ پذیرش مشروط مقاله: ۱۳۹۷/۱۱/۲۹

تاریخ پذیرش مقاله: ۱۳۹۸/۴/۲۶

نام نویسنده‌ی مسئول: دکتر میدیا رشادی

نشانی نویسنده‌ی مسئول: تهران- انتهای بزرگراه شهید ستاری- میدان دانشگاه- بلوار شهدای حصارک- دانشگاه آزاد اسلامی واحد علوم و تحقیقات- دانشکده‌ی کامپیوتر

## ۱- مقدمه

کم کانال‌های بی‌سیم در تراشه و استفاده مشترک همه هسته‌ها از پهنای‌بند لینک‌های بی‌سیم برای ارتباط بین هسته‌ای، این لینک‌ها را به نقاطی داغ<sup>۱۴</sup> و پر ازدحام در شبکه تبدیل کرده است (ازدحام در شبکه افزایش تاخیر و کاهش راندمان شبکه را در پی خواهد داشت). از این‌رو، وجود سازوکارهایی در راستای کنترل ازدحام و کنترل جریان<sup>۱۵</sup> ترافیک‌های بهترین تلاش<sup>۱۶</sup> و گارانتی شده<sup>۱۷</sup> در راستای کاهش ازدحام و افزایش کارایی تراشه، امری ضروری به نظر می‌رسد.

با توجه به مطالعات انجام شده در حوزه شبکه روی تراشه بی‌سیم، مساله مدلسازی کنترل نرخ جریان در شبکه روی تراشه بی‌سیم تاکنون انجام نشده است. به همین منظور، در این مقاله ابتدا مدلسازی مساله کنترل نرخ جریان در شبکه بر روی تراشه بی‌سیم با در نظر گرفتن هر نوع الگوی ترافیکی مورد بررسی قرار گرفته است. فرموله کردن ریاضی مساله به فرم یک مساله بیشینه‌سازی تابع سودمندی<sup>۱۸</sup> ارایه شده است. سپس، برای رسیدن به یک جواب نهایی قابل قبول، مساله مورد نظر با روش ضرایب لاگرانژ<sup>۱۹</sup> و تصویر گرادیان حل شده است. در پایان الگوریتمی تکرارپذیر برای کنترل نرخ جریان هسته‌های پردازشی پیشنهاد شده است. الگوریتم ارایه شده توانسته است نرخ جریان هسته‌های پردازشی را با همگرایی مناسبی تنظیم و کنترل نماید. نوآوری مقاله، در مدلسازی همزمان هر دو نوع الگوی ترافیکی بهترین تلاش و ترافیک گارانتی شده با در نظر گرفتن محدودیت‌های پهنای‌بند لینک‌های ارتباطی در شبکه روی تراشه بی‌سیم است. در تخصیص کانال‌ها به جریان‌های ترافیکی، ابتدا اولویت رزرو پهنای‌بند کانال به جریان‌های گارانتی شده داده می‌شود. سپس، بخشی از پهنای‌بند کانال‌ها که تخصیص داده نشده است به جریان‌های بهترین تلاش اختصاص داده شده است. مدلسازی و الگوریتم پیشنهادی ارایه شده برای هر دو نوع نرخ ترافیک جریان در شبکه، تحلیل دقیق‌تری از ساختار ترافیکی موجود در تراشه‌ها (بستگی به نوع برنامه‌های کاربردی نگاشت شده در تراشه) ارایه کرده است. در پایان، تحت الگوهای ترافیکی و الگوریتم‌های مسیریابی بدون بن بست، الگوریتم پیشنهادی شبیه‌سازی و مورد ارزیابی قرار گرفته شده است.

این مقاله از بخش‌های زیر تشکیل شده است:

در بخش ۲، ضمن مروری کلی بر ساختار شبکه روی تراشه بی‌سیم، کارهای مرتبط در زمینه کنترل جریان در این شبکه بیان شده است. مدل شبکه، مدلسازی ریاضی مساله کنترل نرخ جریان و الگوریتم پیشنهادی در بخش ۳ ارایه شده است. نتایج تحلیل عددی و شبیه‌سازی‌های انجام شده در بخش ۴ آمده است. سرانجام، در بخش ۵، نتیجه‌گیری شرح داده شده است.

## ۲- مروری بر کارهای پیشین

دیگر ابزارهای انتقال بی‌سیم همچون مدار مدولاتور و فیلترهای مخابراتی در مسیریاب‌های شبکه استفاده می‌شوند. معماری شبکه بر

ساده‌ترین ساختار ارتباطی بین اجزای درون یک تراشه، گذرگاه<sup>۱</sup> است. اشکال اساسی سیستم‌های مبتنی بر گذرگاه، کاهش شدید عملکرد سیستم با افزایش تعداد هسته‌های پردازشی است. مجتمع نمودن تعداد زیادی هسته در یک تراشه، گذرگاه ارتباطی بین هسته‌ها را به تنگنایی<sup>۲</sup> برای سیستم تبدیل کرده است. همچنین، در این ساختار ارتباطی، داشتن سازوکاری به عنوان داور<sup>۳</sup> برای کنترل و نحوه دستیابی عادلانه به گذرگاه مشترک امری ضروری است. از طرفی دیگر، عدم انعطاف‌پذیری و مقیاس‌پذیری ساختار گذرگاه مشترک، چالشی مهم در سیستم‌های روی تراشه را پدید آورده است. راه‌حل دیگر برای ارتباط اجزای درون یک تراشه، استفاده از اتصالات نقطه-به-نقطه<sup>۴</sup> است. در این ساختار، هسته‌های پردازشی با سیم‌بندی مستقیم می‌توانند با یکدیگر ارتباط داشته باشند. اشکال عمده این ساختار، پیچیدگی سیم‌کشی بین هسته‌ها و نیز افزایش مساحت (ناحیه) و توان مصرفی تراشه است. شبکه بر روی تراشه<sup>۵</sup> یک ساختار ارتباطی قابل قبول برای ارتباطات بین هسته‌ای درون تراشه است که توانسته است نواقص و چالش‌های ساختارهای قبلی را تا حدودی برطرف نماید. شبکه بر روی تراشه ضمن داشتن مقیاس‌پذیری<sup>۶</sup> مطلوب، توانسته است مساحت، توان مصرفی و پهنای‌بند مناسبی را برای ارتباط ده‌ها یا صدها هسته پردازشی درون یک تراشه فراهم نماید. با این وجود، از چالش‌های اساسی شبکه بر روی تراشه علیرغم کاهش ابعاد ترانزیستورها در سالهای اخیر، مساله تاخیر<sup>۸</sup> اتصال‌های سیمی درون تراشه است که افزایشی به صورت نمایی را نشان داده است (گزارش<sup>۹</sup> ITRS [۱]). افزایش تاخیر و به تبع آن افزایش توان مصرفی یک تراشه، ضرورت ارایه و پیشنهاد ساختارهای ارتباطی جدیدی نظیر شبکه بر روی تراشه سه‌بعدی<sup>۱۰</sup>، شبکه بر روی تراشه نوری<sup>۱۱</sup> و شبکه بر روی تراشه با اتصالات رادیویی (بی‌سیم) را مطرح نموده است [۲]. استفاده از این فناوری‌های نوظهور در صنعت مدارهای مجتمع پیشرفته، توانسته است تاخیر و توان مصرفی تراشه را به طرز چشمگیری کاهش دهد.

در سال‌های اخیر تحقیقاتی در زمینه طراحی و ساخت آنتن‌های سلیکونی<sup>۱۲</sup> با قابلیت مجتمع‌سازی درون تراشه آغاز شده است. این آنتن‌ها با فرکانسی معادل ده تا صد گیگاهرتز درون یک تراشه به کار گرفته شده‌اند [۳]. تحقیقات جدید فرصت بسیار مناسبی را برای معرفی و طراحی ساختار شبکه بر روی تراشه بی‌سیم<sup>۱۳</sup> (WiNoC) فراهم نموده است. وجود ارتباط‌های بی‌سیم با پهنای‌بند بسیار بیشتر نسبت به سیم‌های مسی از یک طرف و حذف مشکلات پارازیتی و توان مصرفی سیم‌های فلزی از طرف دیگر توانسته است تاخیر انتشار در این شبکه را در مقایسه با تاخیر در دیگر ساختارها ارتباطی کاهش دهد [۴]. با این حال، افزایش فرکانس عملیاتی هسته‌های پردازشی، تعداد آنتن‌ها در شبکه بر روی تراشه بی‌سیم با توجه به فرکانس کاری تراشه، مساحت تراشه و حداکثر بهره توان آنتن ابتدا طراحی و سپس به همراه

است. در این طرح، به هر مسیریاب مجهز به آنتن بی‌سیم که نشانه را در اختیار دارد اجازه داده شده است تا از طریق کانال بی‌سیم، بسته‌های خود را ارسال و یا دریافت نماید. بعد از اتمام ارسال بسته‌ها، این نشانه به صورت چرخشی برای استفاده در دیگر مسیریاب‌های بی‌سیم جابه‌جا می‌شود. با این حال، با افزایش تعداد هسته‌های بی‌سیم در تراشه، این سازوکار منجر به افزایش زمان گردش نشانه بین هسته‌ها و کاهش کارایی شبکه شده است. یک سازوکار کنترل دسترسی به نام RACM برای شبکه بر روی تراشه بی‌سیم در مرجع [۱۰] پیشنهاد شده است. این سازوکار به صورت پویا زمان در اختیار گرفتن نشانه در مسیریاب‌های بدون ارسال را بین بقیه مسیریاب‌هایی که از حداکثر زمان خود برای ارسال داده استفاده کرده‌اند، تقسیم کرده است.

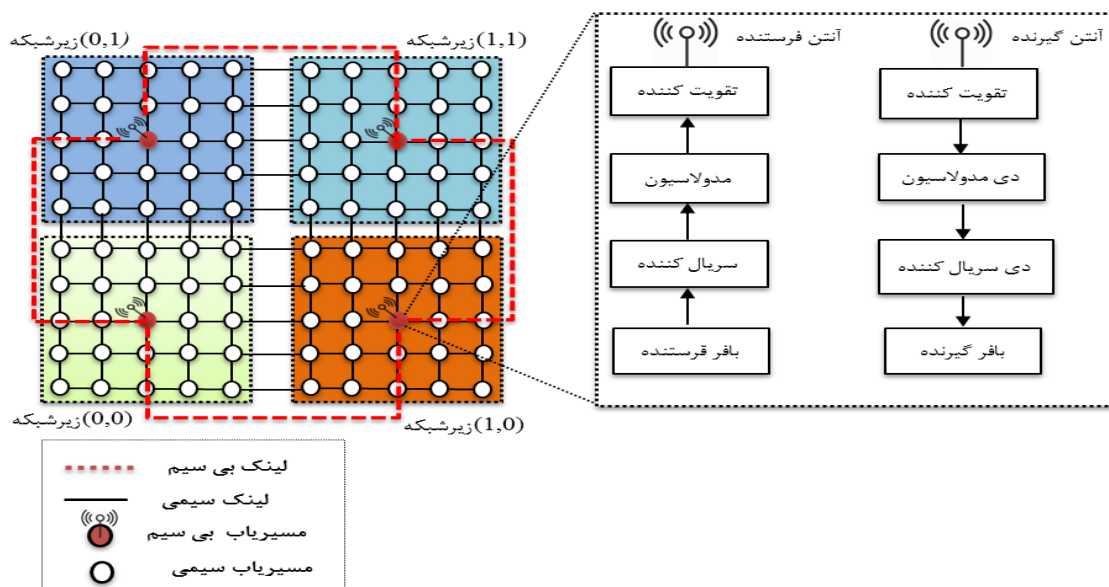
برای دستیابی به حداکثر کارایی، استفاده از الگوریتم‌های مسیریابی عاری از بن بست<sup>۲۷</sup> و تحمل‌پذیر خطا<sup>۲۸</sup> نیز در شبکه روی تراشه بی‌سیم امری ضروری است. یک الگوریتم مسیریابی تحمل‌پذیر خطای کاملاً وفقی (FAFTR) در مرجع [۱۱] پیشنهاد و مورد بررسی قرار گرفته است. یک الگوریتم مسیریابی آگاه از ازدحام برپایه بازه زمانی در ساختار یک شبکه بی‌سیم مش در مرجع [۱۲] پیشنهاد شده است. در مرجع [۱۳] الگوریتمی ارائه شده است که از وضعیت میانگیر<sup>۲۹</sup> مسیریاب‌های بی‌سیم برای تصمیم‌گیری در خصوص کوتاه‌ترین مسیر استفاده نموده است. این الگوریتم توانسته است از ایجاد ترافیک در مسیریاب‌های بی‌سیم جلوگیری کند. الگوریتم‌های کنترل جریان در شبکه روی تراشه می‌توانند شرایط رقابتی به وجود آمده بین هسته‌ها برای در اختیار گرفتن منابع مشترک (نظیر پهنای‌بند کانال‌ها یا میانگیرها) را مدیریت و تخصیص عادلانه منابع را فراهم سازند [۱۴-۱۹].

دو نوع کنترل جریان در شبکه بر روی تراشه بی‌سیم قابل بررسی است: در سازوکارهای سویچ (مسیریاب) به سویچ (مسیریاب)<sup>۳۰</sup> از سیگنال‌های کنترلی بین مسیریاب‌های مجاور به صورت محلی برای تنظیم نرخ جریان ترافیک استفاده شده است. به عنوان نمونه می‌توان به کنترل جریان برپایه اعتبار<sup>۳۱</sup>، کنترل جریان On-Off، قرارداد تصدیق/عدم تصدیق<sup>۳۲</sup> و کنترل جریان برپایه سیگنال دست تکانی<sup>۳۳</sup> اشاره نمود. در این روش‌ها به ارتباط مستقیم بین فرستنده و گیرنده جهت رد و بدل کردن سیگنال‌های کنترلی نیازی نیست. بنابراین سربار کنترلی زیادی به سیستم تحمیل نمی‌شود. با این وجود، با افزایش تعداد هسته‌ها و بزرگتر شدن اندازه شبکه، قبل از

روی تراشه بی‌سیم بر پایه فرکانس محدوده باند فرایهن نخستین بار در مرجع [۵] پیشنهاد شده است. آنتن استفاده شده در این معماری، آنتن دوقطبی مندرج<sup>۳۴</sup> با طول  $2/9$  میلی‌متر مربع است که می‌تواند تا شعاع یک میلی‌متر داده‌ها را منتقل نماید. نرخ ارسال این آنتن  $1/16$  گیگاهرتز بر ثانیه در کانالی با فرکانس  $3/6$  گیگاهرتز است. طراحی یک آنتن زیگزاگ فلزی در مرجع [۳] پیشنهاد شده است. این آنتن تاثیر ناچیزی روی چرخش (زاویه نسبی بین آنتن ارسال و آنتن دریافتی) و قدرت سیگنال دریافتی داشته است. باند فرکانسی میلی‌متر نیز توانسته است پهنای‌بندی بین ده تا صد گیگاهرتز را بدون تضعیف سیگنال فراهم نماید. طراحی آنتن‌هایی کوچک با فرستنده-گیرنده‌هایی ساده که بتواند در فرکانس بین صد تا هزار گیگاهرتز عمل نماید نیز اولین بار در مرجع [۶] پیشنهاد شده است. این آنتن‌ها شعاع ارتباطی از  $10$  تا  $20$  میلی‌متر را بر روی تراشه پوشش داده‌اند. در این معماری، امکان استفاده همزمان از شانزده کانال غیرهمپوشان با فرکانس‌های صد تا  $500$  گیگاهرتز برای ساختار بی‌سیم بر روی تراشه پیشنهاد شده است.

در مرجع [۷] طراحی و ساخت آنتن‌هایی با استفاده از نانو تیوپ‌های کربنی<sup>۳۱</sup> برای اولین بار پیشنهاد شده است. در سال‌های اخیر، آنتن‌های بر پایه گرافن<sup>۳۲</sup> با استفاده از امواج الکترومغناطیسی تا برد ده تراهرتز (THz) برای ارتباط بی‌سیم درون تراشه نیز مورد توجه قرار گرفته است [۸]. از جمله مزایای استفاده از این طرح جدید، استفاده از باند فرکانسی تراهرتز است که علاوه بر پهنای‌بند بیشتر، توان مصرفی و پیچیدگی بسیار پایین‌تری را به همراه داشته است. همچنین، آنتن‌های ساخته شده با استفاده از گرافن بسیار کوچک‌تر از آنتن‌های فلزی با فرکانس مشابه بوده است. طراحی این آنتن‌ها امکان ارتباط همه‌پخشی و چندپخشی روی تراشه را نیز فراهم کرده است. شکل ۱، نمایی کلی از اجزای آنتن در شبکه روی تراشه بی‌سیم را نشان داده است.

برای افزایش کارایی و استفاده حداکثری از پهنای‌بند کانال‌های ارتباطی، علاوه بر طراحی آنتن‌ها، داشتن سازوکارهایی برای کنترل دسترسی به کانال‌های بی‌سیم مشترک<sup>۳۳</sup> در تراشه نیز امری ضروری است. طراحی یک قرارداد<sup>۳۴</sup> کنترل دسترسی به رسانه مشترک در شبکه بر روی تراشه بی‌سیم باید حداقل سربار را به سیستم تحمیل نماید. یک قرارداد دسترسی به کانال مشترک در شبکه بر روی تراشه بی‌سیم در مرجع [۵] معرفی شده است. در این طرح، ابتدا شبکه به چند ناحیه با کمترین تداخل سیگنال تقسیم و سپس براساس یک سیاست دآوری مرکزی، دسترسی به کانال بی‌سیم انجام شده است. همچنین استفاده از یک سیاست دسترسی چندگانه با گام‌های زمانی<sup>۳۵</sup> برای بهبود کارایی شبکه در این مقاله بیان شده است. در مرجع [۹]، یک قرارداد برپایه کنترل جریان نشانه<sup>۳۶</sup> طراحی و پیاده‌سازی شده



شکل (۱): اجزای آنتن در شبکه روی تراشه بی‌سیم

پیشنهاد نگاشت وظایف به هسته‌های آزادتر با توزیع ترافیک در کل شبکه، ازدحام شبکه را کنترل کرده است.

### ۳- مدلسازی ریاضی کنترل نرخ جریان در شبکه روی تراشه بی‌سیم

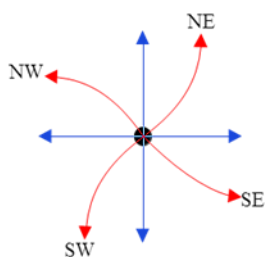
در این بخش، مدل شبکه مورد استفاده بیان شده است. در ادامه مساله کنترل نرخ جریان به صورت یک مساله ریاضی مدلسازی و حل شده است.

#### ۳-۱- مدل شبکه روی تراشه بی‌سیم

شبکه بر روی تراشه بی‌سیم بر پایه یک همبندی مش دو بعدی با تعدادی مسیریاب مجهز به آنتن بی‌سیم در مرکز هر بخش  $3 \times 3$  در نظر گرفته شده است. شکل ۲ نمایی از این ساختار ارتباطی را نشان داده است. ساختار بی‌سیم بر پایه سازوکار دسترسی چندگانه با تقسیم فرکانس<sup>۳۹</sup> (FDMA) و ارسال تک‌گامه بی‌سیم در نظر گرفته شده است. هر مسیریاب بی‌سیم قادر است با استفاده از تنها یک گام به مسیریاب زیربخش مجاور خود دسترسی داشته باشد. در این ساختار پهنای باند کانال‌های بی‌سیم ثابت و بدون خطای بی‌تی فرض شده است. همه مسیریاب‌های بی‌سیم (گره‌های قرمز رنگ) نسبت به هم در دید مستقیم قرار داشته و هر زوج از آنها در باند فرکانسی (کانال) مجزایی نسبت به زوج‌های دیگر کار می‌کند. روش راه‌گزینی<sup>۴۰</sup> به صورت راه-گزینی خزنی<sup>۴۱</sup> است. برای مسیریابی بسته‌ها در ابتدا از الگوریتم مسیریابی XY عاری از بن‌بست (ابتدا بسته در بعد X و سپس در بعد Y حرکت می‌کند) استفاده شده است. الگوهای ترافیکی الگوریتم‌های مسیریابی فاقد بن بست نظیر North-Last و West-first در ادامه

اینکه اطلاعات کنترل ازدحام مسیریاب‌ها در زمان مناسب به مبدا برسد، بسته‌های ارسالی فرستنده به طور حتم ازدحام در شبکه را بیشتر می‌کنند. در سازوکارهای کنترل جریان انتها به انتها<sup>۳۴</sup> هسته‌های فرستنده نرخ تولید و تزریق ترافیک جریان‌های به درون شبکه را بر عهده دارند. این روش افزودنی بسته و ازدحام در شبکه را ندارد. در شبکه بر روی تراشه برخلاف شبکه‌های کامپیوتری امکان حذف و گم شدن بسته‌ها وجود ندارد به همین دلیل به سیگنال‌های تصدیقی جهت ارسال و دریافت سالم بسته‌ها نیز نیازی نیست. از این رو، روش-های کنترل جریان انتها به انتها سربار کنترلی زیادی را به سیستم تحمیل نخواهد کرد و هر هسته به صورت مستقل مسوول کنترل و تنظیم نرخ جریان ارسالی خواهد بود. برای شبکه بی‌سیم بر روی تراشه با مسیریاب‌های مجهز به آنتن‌های بی‌سیم، دو نوع جریان رقابتی قابل بررسی است: جریان درونی<sup>۳۵</sup> و جریان بیرونی<sup>۳۶</sup>. در مرجع [۱۸] یک سازوکار کنترل جریان توزیع شده به همراه استراتژی مدیریت میانگیر برای بهبود کارایی شبکه بر روی تراشه بی‌سیم ارائه شده است. استفاده از ارسال رو به جلوی سریع با اولویت‌بندی جریان‌های رقابتی جهت دسترسی به کانال و نیز یک صف‌بندی مجازی در خروجی درگاه‌ها در این مرجع پیشنهاد شده است. در مرجع [۲۳] از اطلاعات میانگیر هر مسیریاب بی‌سیم جهت جلوگیری از ازدحام استفاده شده است. اگر میانگیر مسیریاب بی‌سیم پر شود دیگر از کانال‌های بی‌سیم جهت ارسال داده‌ها استفاده نخواهد شد. این مکانیزم ازدحام به وجود آمده را کمتر کرده است. در مرجع [۱۷] الگوریتم CAP-W از یک مسیریابی ترکیبی برای حل مساله ازدحام محلی در ساختار شبکه روی تراشه بی‌سیم استفاده کرده است. الگوریتم مسیریابی ارائه شده با تغییر وضعیت یک مسیریابی قطعی<sup>۳۷</sup> به مسیریابی وقتی<sup>۳۸</sup> و نیز

$x = (x_k, k \in K)$	نرخ تزریق هر هسته
$x'_k (\forall k \in K(BT))$	نرخ ترافیک بهترین تلاش
$x''_k (\forall k \in K(GT))$	نرخ ترافیک گارانتی شده
$c = (c_l, l \in L)$	پهنای باند هر لینک
$L(k) \subseteq L$	مجموعه‌ای از لینک‌های در دسترس که جریان از آنها عبور می‌کند
$K(l) \subseteq K$	مجموعه‌ای از هسته‌های پردازشی که جریان آنها از لینک $l$ عبور می‌کنند
$A = (A_{lk})_{L \times K}$	ماتریس الگوی ترافیکی



شکل (۳): مسیریاب بی‌سیم با هشت جهت ارسال و دریافت

### ۳-۲- مدلسازی مساله کنترل نرخ جریان

در این بخش، مساله کنترل نرخ جریان در شبکه روی تراشه بی‌سیم با استفاده از مدلسازی ریاضی بیان شده است. به منظور کنترل و تنظیم نرخ جریان‌ها، مساله به فرم یک مساله برپایه سودمندی با محدودیت پهنای باند لینک‌ها و نیز نرخ جریان هسته‌های پردازشی بازنویسی شده است. هدف از بیان این مساله، بیشینه نمودن نرخ جریان همه هسته‌های پردازشی با در نظر گرفتن محدودیت‌های ذکر شده است ( $\sum U_k(x_k)$ ). مفهوم تابع سودمندی از علم اقتصاد الهام گرفته شده است و میزان رضایت‌مندی یا رفاه یک مصرف‌کننده یا فروشنده از کالا یا محصولی را نشان می‌دهد که در اختیار دارد. در مدل پیشنهادی، برای هر فرستنده ( $k$ ) یک تابع سودمندی به نام  $U$  براساس مقدار نرخ جریان ( $x$ ) (مقدار ترافیک بهترین تلاش یا گارانتی شده) تعریف شده است. هدف از مدلسازی، بیشینه نمودن مجموع همه نرخ‌های ترافیکی هسته‌های درون تراشه برای دستیابی تراشه به حداکثر کارایی مطلوب در زمان اجرا است. تابع  $U_k$  را تابعی افزایشی، مشتق‌پذیر و مقعر<sup>۴۴</sup> در نظر گرفته شده است [۲۱]. شکل ۵ مراحل انجام عملیات مدلسازی را نشان می‌دهد.

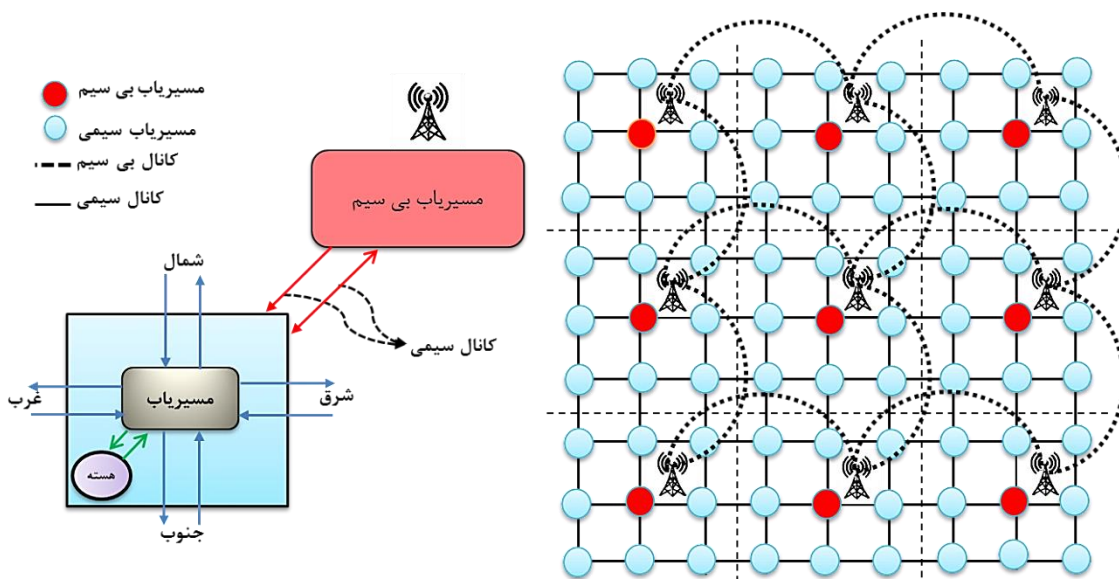
شبیه‌سازی مورد بررسی قرار گرفته است. مسیریابی بین هر زوج فرستنده و گیرنده‌ی که در یک ناحیه  $3 \times 3$  قرار گرفته است با استفاده از هر یک از الگوریتم‌های مسیریابی فوق انجام می‌شود. اگر فرستنده و گیرنده در یک بخش  $3 \times 3$  نباشند آنگاه برای مسیریابی بسته، ترکیبی از الگوریتم‌های مسیریابی و لینک‌های بی‌سیم برای ارسال فلیت‌های<sup>۴۴</sup> یک بسته بین فرستنده و گیرنده استفاده شده است. (ابتدا فلیت‌ها به نزدیک‌ترین مسیریاب بی‌سیم در یک ناحیه منتقل می‌شوند. سپس مسیریاب بی‌سیم فلیت‌ها را به سمت دیگر مسیریاب بی‌سیم که در نزدیکی گیرنده نهایی است ارسال می‌کند. در پایان، فلیت‌ها توسط مسیریاب بی‌سیم و الگوریتم مسیریابی به گیرنده تحویل داده می‌شوند.)

با استفاده از این الگوهای مسیریابی، ماتریس  $A$  تشکیل می‌شود. این ماتریس، نمایش الگوهای مسیریابی بین هر زوج فرستنده و گیرنده را نشان می‌دهد. در ساختار پیاده‌سازی شده، اندازه‌ای ماتریس  $A$ ،  $64 \times 36$  است (۶۴ سطر و ۳۶ ستون برای یک شبکه  $6 \times 6$ ). از آنجائیکه یکی از ویژگی‌های الگوریتم‌های مسیریابی شبکه بر روی تراشه، جلوگیری از وقوع بن‌بست است لذا، برای جلوگیری از بن بست در اجرای الگوریتم پیشنهادی از مدل چرخشی اکتاگون<sup>۴۴</sup> [۲۰] در الگوریتم‌های مسیریابی استفاده شده است. این مدل از چهار چرخش ساعتگرد و چهار چرخش پادساعتگرد برای جلوگیری از بن بست و ایجاد چرخه استفاده می‌کند. قوانین این مدل به صورت زیر بیان شده است:

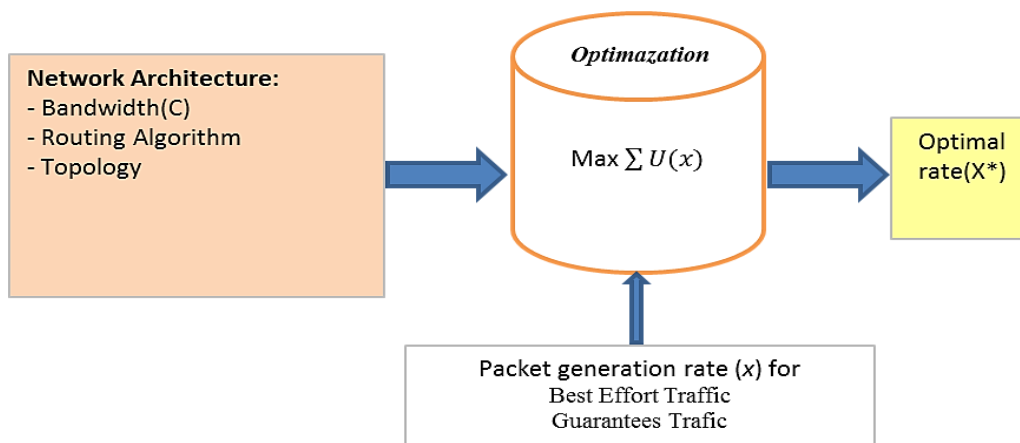
- فلیت‌های یک بسته اجازه چرخش در چهار جهت ساعتگرد زیر را نخواهد داشت: (W: غرب، N: شمال، S: جنوب و E: شرق)  
 $W \rightarrow SE, N \rightarrow SW, E \rightarrow NW, \text{ and } S \rightarrow NE$
  - فلیت‌های اجازه چرخش در چهار جهت پادساعتگرد را نیز نخواهند داشت:  
 $NE \rightarrow S, NW \rightarrow E, SW \rightarrow N, \text{ and } SE \rightarrow W$
- شکل ۳ نمایش هشت درگاه (جهت‌هایی که فلیت‌های یک بسته می‌توانند ارسال یا دریافت شوند) در یک مسیریاب مجهز به آنتن بی‌سیم را نشان داده است. در جدول ۱ نیز نمادهای به کار رفته در مدلسازی پیشنهادی ارائه شده است.

جدول (۱): نمادهای به کار رفته در مدل پیشنهادی

نماد	تعاریف
$k \in K = \{1, 2, \dots, K\}$	مجموعه هسته‌ها
$l \in L = \{1, 2, \dots, L\}$	مجموعه ای از لینک‌های سیمی و بی سیم



شکل (۲): ساختار شبکه بر روی تراشه بی سیم



شکل (۵): مراحل انجام مدلسازی مساله کنترل جریان

subject to:

$$A \cdot x \leq C$$

$$\Rightarrow A \left[ \sum_{k \in K(BT)(l)} x_k + \sum_{k \in K(GT)(l)} x_k \right] \leq C_l \quad \forall l \in L$$

$$x_k > 0 \quad \forall k \in K \quad (4)$$

برای حل این مساله بهینه سازی غیرخطی از ضرایب لاگرانژ برای بازنویسی مجدد مساله استفاده شده است:

$$L(x, \rho^\alpha) = \sum U_k(x_k) - \rho^\alpha (A \cdot x - C) \quad (5)$$

فرمول ۱ نشان داده است که مجموع نرخ جریان های عبوری از یک لینک نمی تواند بیشتر از پهنای باند آن لینک باشد. نماد  $A$  ماتریس الگوی ترافیک عبوری از لینک ها است که توسط الگوی الگوریتم مسیریابی پیاده سازی شده در شبکه مورد نظر نوشته بدست می آید.

$$A^* x \leq c \quad (1)$$

حال جهت کنترل نرخ جریان های بهترین تلاش و گارانتی شده هسته ها با هدف بیشینه سازی مجموع نرخ همه جریان ها روابط زیر را می توان نوشت:

$$\max \sum_{k \in K} U_k(x_k) \quad (2)$$

$$(3)$$

$$\rho_1^\alpha(t+1) = \left[ \rho_1^\alpha(t) - \psi \frac{\partial D(\rho^\alpha(t))}{\partial \rho_1^\alpha} \right]^+ \quad (14)$$

$$\frac{\partial D(\rho^\alpha(t))}{\partial \rho_1^\alpha} = C_1 - \left[ \sum_{k \in K_{(BT)}} x_k + \sum_{k \in K_{(GT)}} x_k \right] (\rho^\alpha) \quad (15)$$

$$\rho_1^\alpha(t+1) = \left[ \rho_1^\alpha(t) + \psi \times \left[ \sum_{k \in K_{(BT)}(l)} x_k + \sum_{k \in K_{(GT)}(l)} x_k \right] \times \rho^\alpha(t) - C_1 \right]^+ \quad (16)$$

در فرمول ۱۶ مقدار  $\psi$  اندازه گام در همگرایی جوابها را نشان می-دهد. این پارامتر عامل مهمی در سرعت همگرایی الگوریتم پیشنهادی است. انتخاب مقدار این پارامتر در پیاده سازی انجام شده براساس مقادیری است که در مرجع [۲۴] به آن اشاره شده است. اگر مجموع هزینه های بدست آمده برای لینک  $l$  از پهنای باند لینک  $l$  بیشتر باشد به عبارتی مقدار رابطه

$$\left[ \sum_{k \in K_{(BT)}(l)} x_k + \sum_{k \in K_{(GT)}(l)} x_k \right] \times \rho^\alpha(t) - C_1$$

مثبت شود، آنگاه هزینه این لینک در گام بعدی افزایش خواهد یافت (خط  $b$  در شبه کد الگوریتم پیشنهادی). شبه کد الگوریتم پیشنهادی برای مساله کنترل نرخ جریان ترافیکی به صورت یک الگوریتم تکرار پذیر در جدول ۲ نشان داده شده است.

#### ۴- تحلیل عددی و شبیه سازی

پیاده سازی الگوریتم پیشنهادی بر روی شبکه روی تراشه بی سیمی با ۳۶ هسته پردازشی (چهار مسیریاب بی سیم (گره های زرد رنگ) و ۳۲ مسیریاب بدون آنتن (گره های آبی رنگ)) و ۶۴ لینک (چهار لینک بی-سیم (لینک های نقطه چین) و ۶۰ لینک سیمی) که در یک ساختار مش ۶×۶ سازماندهی شده است. با استفاده از ابزار CVX[25] و شبیه-ساز Noxim [۲۶] مورد بررسی قرار گرفته است. پهنای باند لینک های سیمی ۱ گیگا بیت بر ثانیه و برای کانال های بی سیم ۲ گیگابیت بر ثانیه در نظر گرفته شده است. الگوی ترافیکی تولید شده توسط هسته ها به صورت یکنواخت است. در این الگو هر هسته قادر است برای تمامی هسته های موجود در شبکه، بسته های خود را ارسال یا از آنها بسته دریافت نماید.

$$L(x, \rho^\alpha) = \sum_{k \in K} U_k(x_k) - \sum_{l \in L} \rho_l^\alpha \left( \sum_{k \in K} A_{lk} x_k - C \right) \quad (6)$$

$$L(x, \rho^\alpha) = \sum_{k \in K} U_k(x_k) - \sum_{l \in L} \rho_l^\alpha \left( \sum_{k \in K} A_{lk} x_k - C \right) \quad (7)$$

$$L(x, \rho^\alpha) = \sum_{k \in K} U_k(x_k) - \left( \sum_{l \in L} \rho_l^\alpha \sum_{k \in K} A_{lk} x_k \right) + \sum_{l \in L} \rho_l^\alpha C_1$$

$$= \sum_{k \in K} U_k(x_k) - \sum_{k \in K} x_k \sum_{l \in L} \rho_l^\alpha A_{lk} + \sum_{l \in L} \rho_l^\alpha C_1$$

$$\sum_{k \in K} U_k(x_k) - \left[ \sum_{k \in K_{(BT)}(l)} x_k + \sum_{k \in K_{(GT)}(l)} x_k \right] \sum_{l \in L} \rho_l^\alpha A_{lk} + \sum_{l \in L} \rho_l^\alpha C_1$$

$$\lambda_l^\alpha = \sum_{l \in L} \rho_l^\alpha A_{lk} = \sum_{l \in L(k)} \rho_l^\alpha \quad (8)$$

$\lambda_l^\alpha$ : مجموع هزینه همه لینک هایی در طول مسیر است که جریان یکسانی از آنها عبور می کند. (معادل هزینه ای است که یک هسته برای عبور جریان خود از این لینکها باید پرداخت نماید [۲۲]).

براساس نظریه دوگان<sup>۴۵</sup> برای هر مساله بهینه سازی محدب<sup>۴۶</sup> دوگان آن را نیز می توان نوشت. دوگان مساله در فرمول ۲ به فرم زیر نوشته شده است [۲۳]:

$$(9)$$

$$L(x, \rho^\alpha) = \sum_{k \in K} U_k(x_k) - \left( \lambda_l^\alpha \left[ \sum_{k \in K_{(BT)}(l)} x_k + \sum_{k \in K_{(GT)}(l)} x_k \right] \right) + \rho^\alpha C$$

$$D: \min_{\rho^\alpha \geq 0} D(\rho^\alpha)$$

where

$$D(\rho^\alpha) = \max_x L(x, \rho^\alpha) \quad (10)$$

$$= \max_x \sum_{k \in K, x \in x_{BT}, x \in x_{GT}} \left( U_k(x_k) - \lambda_l^\alpha x_k \right) + \sum_{l \in L} \rho_l^\alpha c_l$$

با فرض اینکه تابع سودمندی مقعر و مشتق پذیر باشد مقدار نهایی و سراسری نرخ جریان هسته ها از رابطه زیر بدست می آید:

$$D(\rho^\alpha) = \sum_{k \in K} \max_{x_k \in [m_x, M_x]} \left( U_k(x_k) - \lambda_l^\alpha x_k \right) + \sum_{l \in L} \rho_l^\alpha c_l \quad (11)$$

$$U'_k(x_k) - \lambda_l^\alpha = 0 \quad (12)$$

$$x_k(\rho^\alpha) = \left[ U_k'^{-1}(\lambda_l^\alpha) \right]_{m_k}^{M_k} \quad (13)$$

در این حالت اگر  $\rho^{\alpha*}$  مقدار بهینه تابع دوگان نوشته شده باشد  $x_k(\rho^{\alpha*})$  نیز جواب بهینه تابع اولیه است. برای حل مساله دوگان نوشته شده از روش تصویر گرادیان<sup>۴۷</sup> استفاده شده است. در این روش مقدار  $\rho^\alpha$  در جهت مخالف گرادیان  $\nabla D(\rho^\alpha)$  تنظیم می شود.

Do Until  $\max |x_k^{(t+1)} - x_k^{(t)}| < 0$

**Link Price Update:**

a. Received rates  $x_k(t)$  from all sources  
 $k \in K(l) \forall (k \in K_{BT}(l) \cup k \in K_{GT}(l))$

b. Update price by Eq.(16)

$$\rho_l^\alpha(t+1) = \left[ \rho_l^\alpha(t) + \psi \times \left( \sum_{k \in K_{BT}(l)} x_k + \sum_{k \in K_{GT}(l)} x_k \right) \times \rho_l^\alpha(t) - C_l \right]^+$$

c. Send  $\rho_l^\alpha(t+1)$  to all sources  $k \in K(l)$

**Rate Adaption:**

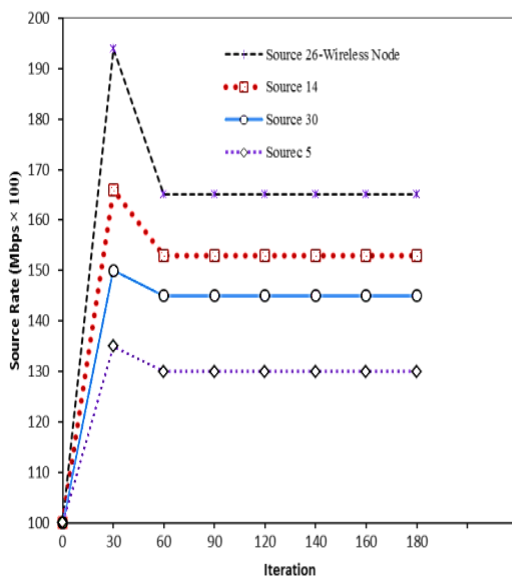
a. Received link prices  $\rho_l^\alpha(t)$  from all links  
 $l \in L(k)$

b. Calculate  $\lambda_k^\alpha(t) = \sum_{l \in L(k)} A_{lk} \rho_l^\alpha$

c. Adjust rate by Eq.(13)

$$x_k(\rho^\alpha) = \left[ U_k^{-1}(\lambda_k^\alpha) \right]_{m_k}^{M_k}$$

d. Send  $x_k(t+1)$  to all links.



شکل (۷): نرخ جریان هسته‌ها با طول گام  $\psi = 3 / (1+t)$  و الگوی ترافیک یکنواخت

در این پیاده‌سازی، نحوه همگرا شدن نرخ جریان هسته‌ها به یک نقطه تعادل نهایی نیز نشان داده شده است. فرستنده هر جریان با تنظیم نرخ جریان ارسالی، ضمن استفاده موثرتر از پهنای‌بند موجود لینک‌ها، از ازدحام در شبکه نیز جلوگیری می‌نماید. شکل ۷ نشان داده است که الگوریتم پیشنهادی با طول گام  $\psi = 3 / (1+t)$ ، نرخ جریان همه هسته‌ها را بعد از ۶۰ تکرار به نقطه بهینه همگرا کرده است. گره مجهز به آنتن بی‌سیم توانسته است نرخ جریان بیشتری را در ابتدای کار نسبت به دیگر گره‌ها داشته باشد با این حال بعد از تکرار ۳۰ ام نرخ جریان گره موردنظر نیز با کاهش مواجه شده است. دلیل این امر این است که بسته‌های ارسال شده برای مقصدهای دور (گره‌های دیگر نواحی) باید از این نقطه عبور نمایند. این مساله باعث به وجود آمدن ازدحام در مسیرهای بی‌سیم شده است. از این‌رو، نرخ جریان نسبت به مقدار اولیه کاهش محسوسی داشته است. همچنین با طول گام  $\psi = 1 / (1+t)$ ، الگوریتم پیشنهادی توانسته است بعد از ۹۱ تکرار نرخ جریان‌ها را به مقدار تعادل نهایی خود همگرا نماید (شکل ۸). نرخ جریان‌ها در تکرارهای ۵۰، ۱۰۰ و ۱۵۰ در الگوریتم پیشنهادی برای دو سناریو با نیز نشان داده شده است. شکل ۹ نشان داده است که برای طول گام  $\psi = 1 / (1+t)$  مقدار نرخ‌ها تقریباً بعد از تکرار نود و سوم همپوشانی داشته و بدون تغییر مانده است. در صورتیکه برای طول گام  $\psi = 3 / (1+t)$ ، این نرخ‌ها از تکرار ۵۰ به بعد بدون تغییر بوده است. این مساله سرعت همگرا شدن سریع الگوریتم پیشنهادی را اثبات خواهد کرد (شکل ۱۰). در شکل ۱۱ توان عملیاتی شبکه تحت الگوهای ترافیک یکنواخت و Bit-Complement نشان داده شده است. همانطور که مشاهده شده است الگوریتم پیشنهادی توانسته است توان عملیاتی شبکه را بهبود دهد. کنترل نرخ جریان تزریقی هسته‌ها، با کاهش ترافیک عبوری از هر لینک کاهش ازدحام در مسیرهای شبکه را به همراه داشته است. همچنین تعداد بسته‌های دریافتی در هر هسته نیز افزایش داشته است. از این‌رو، توان عملیاتی شبکه بهبود یافته است.

در شکل ۱۲، توان عملیاتی اشباع شبکه تحت الگوهای ترافیکی مصنوعی با الگوریتم‌های مسیریابی فاقد بن‌بست ارزیابی شده است. روش پیشنهادی تحت همه سناریوهای ترافیکی مصنوعی با در نظر گرفتن ترافیک‌های بهترین تلاش و گارانتی شده و با الگوریتم مسیریابی XY توانسته است بیشترین مقدار توان عملیاتی را در حالت اشباع داشته باشد.

جدول (۲): شبه‌کد الگوریتم پیشنهادی برای کنترل نرخ جریان در

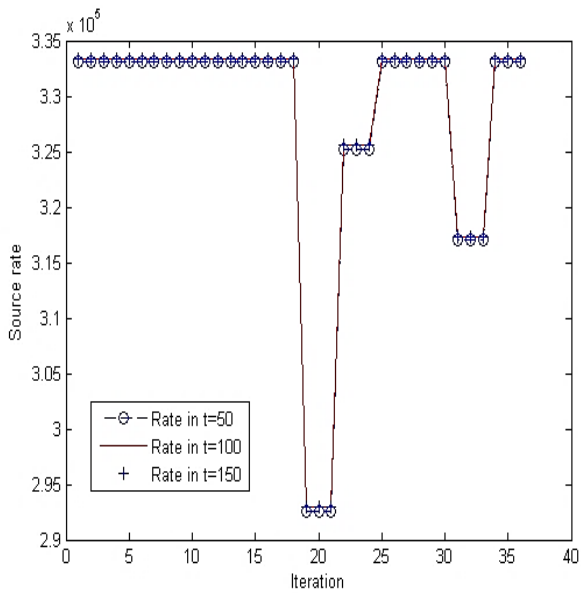
شبکه بر روی تراشه بی‌سیم

**Initialization:**

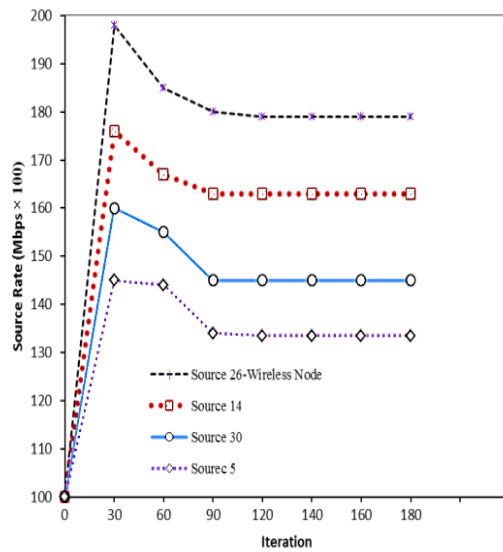
1. Initialize  $C_l$  of all links.
2. Set link price vector to zero.

**Main loop**

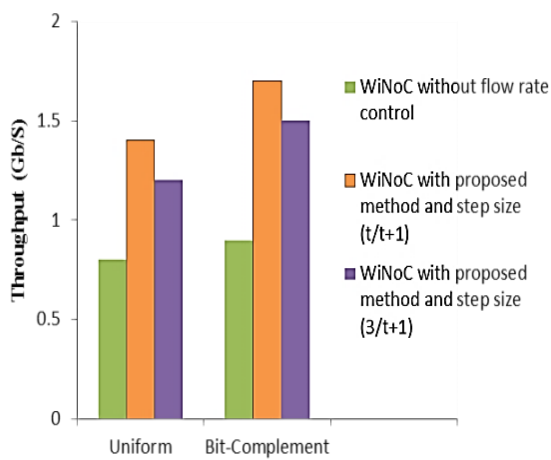




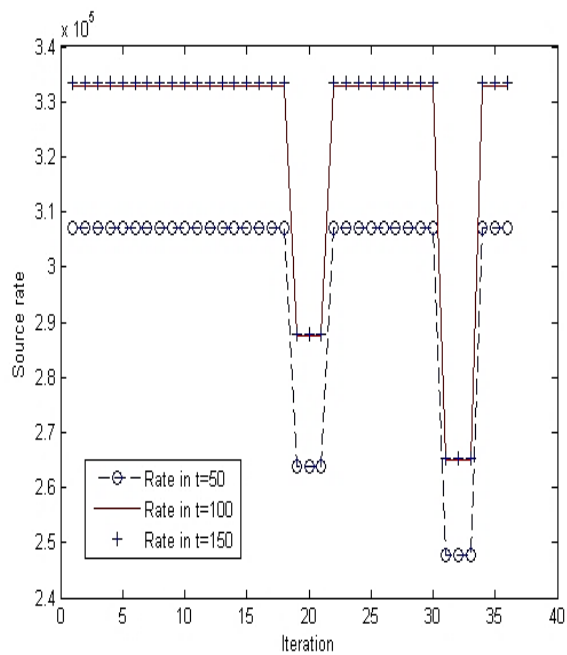
شکل (۱۰): نحوه همگرا شدن نرخ‌ها در تکرارهای ۵۰، ۱۰۰ و ۱۵۰ با الگوی ترافیک Bit-Complement و با طول گام  $\psi = 3 / (1 + t)$



شکل (۸): نرخ جریان هسته‌ها با طول گام  $\psi = 1 / (1 + t)$  و الگوی ترافیک یکنواخت



شکل (۱۱): توان عملیاتی شبکه در الگوی‌های ترافیکی یکنواخت و Bit-Complement

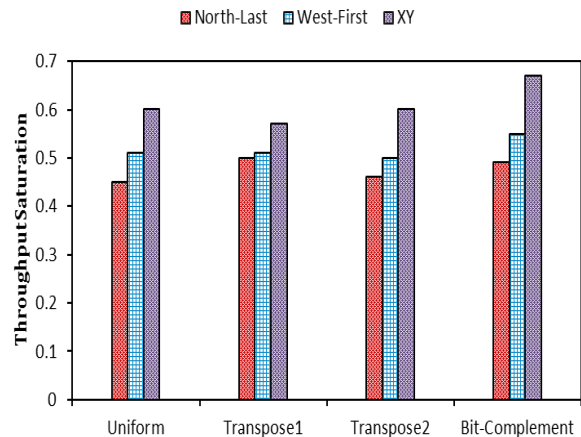


شکل (۹): نحوه همگرا شدن نرخ‌ها در تکرارهای ۵۰، ۱۰۰ و ۱۵۰ در الگوی ترافیک یکنواخت و با طول گام  $\psi = 1 / (1 + t)$

قابل قبولی تنظیم و توان عملیاتی شبکه را بهبود داده است. همچنین سرعت همگرایی در الگوریتم پیشنهادی با توجه به پارامتر اندازه گام نشان داده شده است.

### مراجع:

- [1] International Technology Roadmap for Semiconductors. Available: <http://www.itrs.net>
- [2] A. Ben Achballah, S. Ben Othman, S. Ben Saoud, "Problems and challenges of emerging technology networks-on-chip: A review", *Microprocessors and Microsystems*, 53 (2017) 1-20.
- [3] J. Lin Jr, H.-T. Wu, Y. Su, L. Gao, A. Sugavanam, and J. E. Brewer, "Communication using antennas fabricated in silicon integrated circuits," *Solid-State Circuits, IEEE Journal of*, vol. 42, pp. 1678-1687, 2007.
- [4] S. Deb, A. Ganguly, P. P. Pande, B. Belzer, and D. Heo, "Wireless NoC as interconnection backbone for multicore chips: Promises and challenges," *Emerging and Selected Topics in Circuits and Systems, IEEE Journal on*, vol. 2, pp. 228-239, 2012.
- [5] D. Zhao and Y. Wang, "SD-MAC: Design and synthesis of a hardware-efficient collision-free QoS-aware MAC protocol for wireless network-on-chip," *Computers, IEEE Transactions on*, vol. 57, pp. 1230-1245, 2008.
- [6] S.-B. Lee, S.-W. Tam, I. Pefkianakis, S. Lu, M. F. Chang, C. Guo, et al., "A scalable micro wireless interconnect structure for CMPs," in *Proceedings of the 15th annual international conference on Mobile computing and networking*, 2009, pp. 217-228.
- [7] K. Kempa, J. Rybczynski, Z. Huang, K. Gregorczyk, A. Vidan, B. Kimball, et al., "Carbon nanotubes as optical antennae," *Advanced Materials*, vol. 19, pp. 421-426, 2007.
- [8] Abadal, S., Llatser, I., Mestres, A., Solé-Pareta, J., Alarcón, E., & Cabellos-Aparicio, "Fundamentals of Graphene-Enabled Wireless On-Chip Networking," In *Modeling, Methodologies and Tools for Molecular and Nano-scale Communications* (pp. 293-317). 2017.
- [9] K. Chang, S. Deb, A. Ganguly, X. Yu, S. P. Sah, P. P. Pande, et al., "Performance evaluation and design trade-offs for wireless network-on-chip architectures," *ACM Journal on Emerging Technologies in Computing Systems (JETC)*, vol. 8, p. 23, 2012.
- [10] M. Palesi, M. Collotta, A. Mineo, and V. Catania, "An Efficient Radio Access Control Mechanism for Wireless Network-On-Chip Architectures," *Journal of Low Power Electronics and Applications*, vol. 5, pp. 38-56, 2015.
- [11] Dehghani, A., & Jamshidi, K., "A fault-tolerant hierarchical hybrid mesh-based wireless network-on-chip architecture for multicore platforms," *The Journal of Supercomputing*, 71(8), 3116-3148.2015
- [12] S. Mikaeeli Mamaghani and M. A. Jabraeil Jamali, "A load-balanced congestion-aware routing algorithm based on time interval in wireless network-on-chip," *Journal of Ambient Intelligence and Humanized Computing*, journal article September 03 2018.
- [13] Hu, W. H., Wang, C., & Bagherzadeh, N., "Design and analysis of a mesh-based wireless network-on-chip," *The Journal of Supercomputing*, 71(8), 2830-2846.2015
- [14] Ogras, U. Y., & Marculescu, R., "Analysis and optimization of prediction-based flow control in



شکل (۱۲): توان عملیاتی شبکه تحت الگوی های ترافیکی مصنوعی با الگوریتم های مسیریابی بدون بن بست

### ۵- نتیجه گیری

با پیشرفت صنعت مدارهای مجتمع، تعداد هسته های پردازشی درون یک تراشه روز به روز در حال افزایش است. در اینگونه تراشه ها، پیکربندی شبکه روی تراشه یک راه حل مفید برای ارتباط هسته های پردازشی جهت تبادل بسته های داده است. با افزایش تعداد هسته ها در یک تراشه تاخیر انتشار و توان مصرفی تراشه نیز افزایش چشمگیری داشته است. به همین علت، طراحی و پیاده سازی یک شبکه میان ارتباطی جدید که بتواند ضمن مقیاس پذیر بودن، تاخیر و توان مصرفی کمتری را نیز داشته باشد، در بهبود کارایی سیستم های نهفته<sup>۴۸</sup> نقش بسزایی را داشته است. در سالهای اخیر، استفاده از آنتن های بی سیم در تراشه علاوه بر فراهم نمودن لینک هایی با پهنای باند بیشتر، تاخیر انتشار ناشی از انتقال بسته ها در تراشه را کاهش داده است. در شبکه روی تراشه بی سیم، تقاضای هسته های پردازشی برای عبور جریان های ترافیکی خود از ناحیه ای به ناحیه ای دیگر توسط مسیریاب های مجهز به این کانال های بی سیم، موجب شده است که این مسیریاب ها به نقاطی داغ و پر ازدحام در تراشه ها تبدیل شوند. ازدحام در شبکه کیفیت سرویس<sup>۴۹</sup> و استفاده کارآمد از منابع موجود شبکه را کاهش خواهد داد. از این رو، وجود سازوکارهایی جهت کنترل جریان و کنترل ازدحام در مسیریاب های شبکه های روی تراشه بی سیم امری ضروری است. در این مقاله، مدلسازی ریاضی کنترل نرخ جریان هسته های پردازشی به عنوان منابع تولید ترافیک در شبکه بر روی تراشه بی سیم، به صورت یک مساله بهینه سازی تابع سودمندی مورد بررسی قرار گرفته است. حل این مساله تا رسیدن به یک جواب بهینه با نوشتن دوگان مساله اولیه و استفاده از روش تصویر گرادینان انجام شده است. در نهایت الگوریتمی تکرار پذیر برای تنظیم و کنترل نرخ جریان هسته های پردازشی پیشنهاد شده است. نتایج تحلیل عددی و شبیه سازی های انجام شده در شبکه روی تراشه بی سیم تحت الگوهای ترافیکی مصنوعی و الگوریتم های مسیریابی مختلف، نشان داده است که الگوریتم پیشنهادی نرخ جریان هسته های پردازشی را با سرعت

- 15 Flow Control
- 16 Best Effort Traffic (BT)
- 17 Guarantees Traffic (GT)
- 18 Utility Function
- 19 Lagrange multiplier
- 20 Meander Dipole Antenna (MDA)
- 21 Carbon Nano Tube(CNT)
- 22 Graphene-Based Antenna
- 23 Media Access Control (MAC)
- 24 Protocol
- 25 Time-Hopping Multiple Access
- 26 Token Flow Control
- 27 Deadlock
- 28 Fault Tolerant
- 29 Buffer
- 30 Switch-to-Switch Flow Control Mechanism
- 31 Credit Based Flow Control
- 32 ACK/NACK Protocol
- 33 Handshaking Signal Based Flow Control
- 34 End-to-End Flow Control Mechanism
- 35 Intra-Flow
- 36 Inter-Flow
- 37 Deterministic Routing
- 38 Adaptive Routing
- 39 Frequency Division Multiple Access
- 40 Switching
- 41 Wormhole Switching
- 42 Flit : کوچکترین بخش یک بسته که در شبکه بر روی تراشه ارسال می‌شود
- 43 Octagon Turn Model
- 44 Concave
- 45 Dual theory
- 46 Convex
- 47 Gradient Projection
- 48 Embedded System
- 49 Quality of Service(QoS)

networks-on-chip." In Modeling, Analysis and Optimization of Network-on-Chip Communication Architectures (pp. 105-133). 2013.

[15] A. Rezaei, M. Daneshlab, D. Zhao," CAP-W: Congestion-Aware Platform for Wireless-based Network-on-Chip in Many-Core Era," Microprocessors and Microsystems, (2017).

[16] Talebi, M. S., Jafari, F., Khonsari, A., & Yaghmaee, M. H," Proportionally fair flow control mechanism for best effort traffic in network-on-chip architectures", International Journal of Parallel, Emergent and Distributed Systems, 25(4), 345-362.2010.

[17] Durand, Y., Bernard, C., & Clermidy, F," Distributed Dynamic Rate Adaptation on a Network on Chip with Traffic Distortion," In Embedded Multicore/Many-core Systems-on-Chip (MCSoc), 2016.

[18] Y. Wang and D. Zhao, "Distributed flow control and buffer management for Wireless Network-on-Chip," in Circuits and Systems, 2009. ISCAS 2009. IEEE International Symposium on, 2009, pp. 1353-1356.

[19] C. Wang, W.-H. Hu, and N. Bagherzadeh, "A wireless network-on-chip design for multicore platforms," in Parallel, Distributed and Network-Based Processing (PDP), 2011 19th Euromicro International Conference on, 2011, pp. 409-416.

[20] D. Zhao and R. Wu, "Overlaid mesh topology design and deadlock free routing in wireless network-on-chip," in Networks on Chip (NoCS), 2012 Sixth IEEE/ACM International Symposium on, 2012, pp. 27-34.

[21] S. H. Low and D. E. Lapsley, "Optimization flow control—I: basic algorithm and convergence," IEEE/ACM Transactions on Networking (TON), vol. 7, pp. 861-874, 1999.

[22] F. P. Kelly, A. K. Maulloo, and D. K. Tan, "Rate control for communication networks: shadow prices, proportional fairness and stability," Journal of the Operational Research society, pp. 237-252, 1998.

[23] S. Boyd and L. Vandenberghe, Convex optimization: Cambridge university press, 2004.

[24] S. Boyd, "Convex Optimization II Lecture Notes," Ed: Stanford University, 2006.

[25] M. Grant, S. Boyd, and Y. Ye, "CVX: Matlab software for disciplined convex programming," ed, 2008.

[26] V. Catania, A. Mineo, S. Monteleone, M. Palesi, and D. Patti, "Cycle-accurate network on chip simulation with noxim," ACM Transactions on Modeling and Computer Simulation (TOMACS), vol. 27, no. 1, p. 4, 2016.

- 1 Bus
- 2 Core
- 3 Bottleneck
- 4 Arbitrator
- 5 Point-to-Point
- 6 Network-on- Chip
- 7 Scalability
- 8 Delay
- 9 International Technology Roadmap for Semiconductors
- 10 Dimensional (3D)
- 11 Photonic Network on Chip (PNoC)
- 12 Silicon Integrated Antenna
- 13 Wireless Network –on- Chip
- 14 Hotspot