



Computational Intelligence in Electrical Engineering  
Vol. 14, No. 2, 2023  
Research Paper

## Developing a Fault-Tolerant Demand-Based Structure for 3D Wireless Networks on Chip Architecture

Mahla Mahmoudzadeh<sup>1</sup>, Vahid Sattari-Naeini<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Dept. of Computer Engineering, Shahid Bahonar University of Kerman, Kerman, Iran

<sup>2</sup> Dept. of Computer Engineering, Shahid Bahonar University of Kerman, Kerman, Iran

### Abstract:

In Network-on-Chip architecture, wired structure and multi-step communication increase consumption power and latency. Combining wired media for a regular transmission and high-bandwidth wireless media for multi-step communication is a way to reduce latency and consumption of power. Wireless nodes are prone to error in on-chip wireless networks due to their complexity and relatively high usage; they are also crowded due to their sharing between several nodes, but their job is to increase efficiency. However, the presence of wireless nodes in wireless networks on the chip increases the cost and area. Therefore, finding an optimal structure for communication between cores is necessary. In this paper, a new three-dimensional architecture for a Wireless Network on Chip is presented, which has two levels; depending on the location of the error in the second level, the wireless routers in the first level are assigned to the processing elements. The demand matrix is used to optimize different traffic patterns. The performance of 3D architecture has been compared under different traffic patterns. The obtained results show that the proposed structure has a relatively good performance and increases the network's reliability.

**Keywords:** Congestion, Network on Chip, Wireless Network on Chip, Reliability.



This is an open access article under the CC BY-NC-ND/4.0/ License (<https://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/4.0/>).



<https://doi.org/10.22108/ISEE.2022.130023.1500>

## ارائه یک ساختار خطاپذیر مبتنی بر تقاضا برای معماری سه‌بعدی شبکه‌های

بی‌سیم روی تراشه

مهلا محمودزاده<sup>۱</sup>، وحید ستاری نایینی<sup>۲\*</sup>

۱- دانشجوی کارشناسی ارشد- گروه مهندسی کامپیوتر- دانشگاه شهید باهنر کرمان- کرمان- ایران

m\_mahla@eng.uk.ac.ir

۲- دانشیار- گروه مهندسی کامپیوتر- دانشگاه شهید باهنر کرمان- کرمان- ایران

vsnaeini@uk.ac.ir

**چکیده:** در معماری شبکه روی تراشه، ساختار سیمی و ارتباطات چندگامی باعث افزایش توان مصرفی و تأخیر می‌شود. ترکیب رسانه سیمی برای انتقال منظم و رسانه بی‌سیم با پهنای باند بالا برای برقراری ارتباطات چندگامی، روشی برای کاهش تأخیر و توان مصرفی است. در شبکه بی‌سیم روی تراشه، گرهای بی‌سیم به دلیل پیچیدگی و استفاده نسبتاً زیاد از آنها، مستعد بروز خطا هستند. همچنین، به دلیل اشتراک‌گذاری آنها بین چندین گره، در معرض ازدحام قرار دارند؛ اما وظیفه آنها، بالابردن بهره‌وری است؛ با این حال، وجود گرهای بی‌سیم در شبکه‌های بی‌سیم روی تراشه، هزینه و مساحت را افزایش می‌دهد؛ بنابراین، یافتن یک ساختار بهینه برای ارتباط بین هسته‌ها ضروری است. در این مقاله، یک معماری سه‌بعدی جدید برای شبکه بی‌سیم روی تراشه ارائه شده که دارای دوسطح است. با توجه به محل خطا در سطح دوم، مسیریاب‌های بی‌سیم در سطح اول به عناصر پردازشی اختصاص داده می‌شوند. از ماتریس تقاضا برای بهینه‌سازی الگوهای مختلف ترافیک استفاده می‌شود. کارایی معماری سه‌بعدی تحت الگوهای ترافیکی مختلف مقایسه شده است. نتایج به‌دست‌آمده نشان می‌دهند ساختار ارائه‌شده دارای عملکرد نسبتاً مطلوبی است و قابلیت اطمینان شبکه را افزایش می‌دهد.

**واژه‌های کلیدی:** ازدحام، شبکه روی تراشه، شبکه بی‌سیم روی تراشه، قابلیت اطمینان.

### ۱- مقدمه

تراشه با فرکانس رادیویی [8] ارائه شده‌اند. اگرچه این روش‌ها تأخیر و توان مصرفی را کاهش می‌دهند، با مشکلات طراحی و ساخت روبه‌رو هستند. وجود مشکلات در معماری شبکه روی تراشه باعث ظهور ایده شبکه بی‌سیم روی تراشه شده است [9-12]. در ابتدا استفاده از ارتباطات بی‌سیم روی تراشه، برای توزیع سیگنال ساعت بوده است [22,23]. با ترکیب مناسبی از هردو رسانه سیمی و بی‌سیم معماری‌های مختلفی ایجاد شد تا مشکلات معماری شبکه روی تراشه سیمی سستی رفع شوند.

اضافه کردن قسمت‌های بی‌سیم [13]، باعث افزایش هزینه و مساحت خواهد شد. برخی از گررها را به فرستنده

با افزایش تعداد هسته‌ها در شبکه روی تراشه [3-5]، هنگام برقراری ارتباطات چندگامی باعث بروز مشکلاتی از قبیل افزایش تأخیر و توان مصرفی می‌شود. برای بهبود کارایی شبکه روی تراشه، روش‌هایی مانند معماری سه‌بعدی [6]، شبکه‌های روی تراشه نوری [7,9]، شبکه‌های روی

<sup>۱</sup> تاریخ ارسال مقاله: ۱۴۰۰/۰۵/۳۰

تاریخ پذیرش مقاله: ۱۴۰۱/۰۸/۱۷

نام نویسنده مسئول: وحید ستاری نایینی

نشانی نویسنده مسئول: ایران - کرمان - دانشگاه شهید باهنر کرمان - گروه مهندسی کامپیوتر

گره مبدأ و زیرشبکه گره مقصد انجام می‌شود. اگر مقصد بسته در زیرشبکه فعلی باشد، مسیریابی از طریق مسیریاب‌های معمولی، بدون درگیر شدن کانال بی‌سیم انجام می‌شود و هنگامی که گره مقصد در زیرشبکه دیگری باشد، مسیر سیمی و بی‌سیم بین مبدأ و مقصد، محاسبه و کوتاه‌ترین مسیر انتخاب می‌شود. از آنجا که کوتاه‌ترین مسیر معمولاً مسیری است که شامل مسیریاب‌های بی‌سیم است، آنها می‌توانند به سرعت تبدیل به نقاط مهم شوند.

در معماری‌های پیشنهاد شده در [17,35]، با انتقال بسته‌های اطلاعاتی از زیرشبکه‌هایی با هاب‌های بی‌سیم معیوب و ازدحام زیاد به زیرشبکه‌هایی با هاب‌های سالم و بدون تراکم در برابر خطاهای متناوب و گذرا، عملکرد شبکه را بهبود می‌بخشند؛ اما به دلیل زیاد بودن تعداد هاب‌ها و همچنین اتصال تمام گره‌های زیرشبکه به هاب، مساحت شبکه بسیار زیاد است.

برای کاهش ازدحام در گره‌های بی‌سیم، الگوریتم‌های مسیریابی ارائه شده در [9,10,11,14]، یک پارامتر  $d$  را تعیین می‌کنند که مسیریابی را از یک مسیر سیمی یا بی‌سیم تعیین می‌کنند.  $d$  بزرگ‌تر به این معنی است که فقط بسته‌های دارای فاصله طولانی بین مبدأ و مقصد از کانال بی‌سیم استفاده کنند؛ اما این الگوریتم‌های مسیریابی، تحمل خطا را در نظر نگرفته‌اند.

فرستنده‌ها و گیرنده‌های مبتنی بر پهنای باند گسترده که در [27,28] استفاده می‌شوند، به دلیل پهنای باند بالایی که دارند، به انتقال بسته چندگانه نیاز دارند که عملکرد کلی شبکه را کاهش دهند؛ در غیر این صورت در عملکرد شبکه تغییری صورت نمی‌گیرد.

عملکرد شبکه‌های بی‌سیم با معماری شبکه مش جهانی، در صورت وجود خطاهای دائمی، در [15,16] با استفاده از گره‌های بی‌سیم کمکی بهبود می‌یابد. هر چند تحمل‌پذیری خطا در یک سیستم با افزونگی به دست می‌آید [1,2]، به دلیل زیاد بودن تعداد گره‌های افزونه، مساحت و هزینه افزایش یافته است.

در جدول ۱، ویژگی‌های مهم‌ترین روش‌های ارائه شده در سال‌های اخیر، آورده شده‌اند.

و گیرنده بی‌سیم مجهز می‌کنند؛ بنابراین، مکان قرارگیری گره‌های بی‌سیم بسیار مهم است. گره‌های بی‌سیم به دلیل اشتراک‌گذاری بین چندین گره و پیچیدگی پیاده‌سازی آنها، نرخ شکست بالاتری نسبت به اجزای دیگر تراشه دارند [15,16] و در معرض خطا و ازدحام قرار دارند.

بر اساس نحوه قرارگیری گره‌های بی‌سیم، در سال‌های اخیر تحقیقات بسیاری در زمینه معماری شبکه‌های بی‌سیم روی تراشه انجام شده است. در ادامه برخی از آنها معرفی شده‌اند.

در مرجع [36]، شبکه جهانی کوچک با معماری چندبعدی و سلسله‌مراتبی معرفی شده است. ابتدا کل شبکه به چند زیر شبکه تقسیم می‌شود و در هر زیر شبکه بسته به نوع توپولوژی آن، مسیریاب‌ها به صورت سیمی با هم در ارتباط هستند. در مرکز هر زیر شبکه یک هاب وجود دارد که مسیریاب‌ها به صورت سیمی به هاب متصل می‌شوند. سطح بالاتر شامل اتصال هاب‌ها است که به صورت بی‌سیم با هم در ارتباط هستند.

در این شبکه‌ها از هاب‌ها برای برقراری ارتباط بین زیر شبکه‌های مختلف استفاده می‌شود. در این حالت، در مقایسه با شبکه‌های مش معمولی کارایی بالاتری دارند [20]؛ اما درجه بالای اتصال در هاب‌ها بین سطوح مختلف سلسله‌مراتبی، باعث سربار بیش از حد در معماری شبکه جهانی کوچک می‌شود. به علاوه به دلیل اشتراک‌گذاری بین چند گره، ممکن است هاب‌ها تبدیل به گلوگاه شوند. در صورت خرابی هاب‌ها، زیر شبکه متصل به آن هاب کاملاً از شبکه جدا می‌شود.

درجه اتصال هاب‌ها در معماری پیشنهادی در [29]، کاهش پیدا کرده است؛ اما در صورت وجود خطا این معماری کارایی چندانی ندارد و همچنین، از الگوریتم مسیریابی دیجکسترا استفاده شده که ساینز جدول‌ها بسیار زیاد است.

معماری دیگری که در شبکه‌های بی‌سیم روی تراشه استفاده می‌شود، یک شبکه مش جهانی، به عنوان پایه در نظر گرفته می‌شود [21-26]. در معماری مش، کل شبکه به چند زیر شبکه تقسیم می‌شود. در مرکز هر زیر شبکه، مسیریاب بی‌سیم قرار می‌گیرد. مسیریابی با توجه به مکان زیر شبکه

جدول (۱): ویژگی ساختارهای ارائه شده

تعداد مسیریاب‌های بی سیم	تعداد هاب‌ها در یک زیرشبکه	تعداد مسیریاب‌ها در هر زیرشبکه	اندازه زیرشبکه	تعداد گره‌های شبکه	Ref.
۱۶	-	۲۵	۵×۵	۴۰۰	[23]
۶	۱	۱۶	۴×۴	۲۵۶	[11]
۳۲-۲۸	-	۲۵	۵×۵	۴۰۰	[15,16]
۴	۱	۱۶	۴×۴	۲۵۶	[29]
16	1	۲۵	۵×۵	400	[36]
۲۰-۸	۱	۲۵	۵×۵	۴۰۰	This work

این مقاله به صورت زیر سازماندهی شده است: در قسمت دوم، معماری پیشنهادی، مطرح و در قسمت سوم، معماری پیشنهادی براساس ماتریس تقاضا بهینه شده‌اند و در قسمت چهارم، چگونگی انتشار اطلاعات ازدحام و خطا در هاب بیان شده است. در قسمت پنجم الگوریتم مسیریابی توضیح داده شده است. در قسمت ششم، معماری پیشنهادی، ارزیابی و در پایان نتیجه‌گیری انجام شده است

## ۲- معماری پیشنهادی

معماری شبکه بی سیم روی تراشه با توپولوژی شبکه و الگوریتم مسیریابی مشخص می‌شود. در این بخش، یک معماری سه بعدی آگاه از ازدحام و مقاوم در برابر خطا، همراه با توپولوژی سطوح مختلف و الگوریتم مسیریابی آن ارائه شده است.

### ۲-۱- توپولوژی

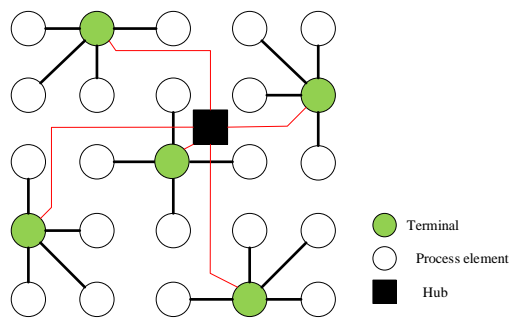
هدف یک سیستم تحمل پذیر خطا این است که با وجود خطا بتواند عملکرد خودش را به درستی انجام دهد. برای رسیدن به این قابلیت، باید از نوعی افزونگی استفاده کرد. هدف ما در این مقاله ارائه یک معماری تحمل پذیر خطا است که با افزونگی همراه است. در ابتدا، شبکه به چند زیرشبکه تقسیم می‌شود. بسته به نوع پیکربندی انتخاب شده، گره‌ها با سیم به هم متصل می‌شوند. هر زیرشبکه یک هاب مرکزی و یک مسیریاب مرکزی بی سیم افزونه دارد. از لحاظ ساختاری، هاب‌ها و مسیریاب‌ها شبیه به یکدیگرند. در هر زیرشبکه پنج گره انتخاب شده است که به هاب مرکزی از طریق سیم به هم متصل شده‌اند. برای اتصال هاب‌ها، سطح دوم معماری دوسطحی تشکیل می‌شود.

در سطح دوم، هاب‌های دور از هم به صورت بی سیم با هم در ارتباط هستند. هاب‌ها به جای درگاه محلی، درگاه‌های اضافی برای ارتباط با گره‌های داخل زیرشبکه دارند. برای افزایش قابلیت اطمینان معماری پیشنهادی، مسیریاب بی سیم در سطح اول معماری دو سطحی قرار می‌دهیم که در صورت معیوب شدن هاب‌ها، سیستم به عملکرد خود ادامه دهد. مسیریاب‌های بی سیم نیز دارای

هدف ما در این مقاله ارائه یک معماری سه بعدی تحمل پذیر خطا است. معماری پیشنهادی با ترکیبی از معماری شبکه جهانی کوچک و شبکه مش جهانی، مزایای هر دو شبکه را دارد. در صورت عدم وجود خطا و ازدحام، معماری مشابه با معماری شبکه کوچک جهانی است؛ زیرا این شبکه‌ها عملکرد بهتری نسبت به شبکه‌های دیگر دارند. به منظور کاهش مساحت و درجه اتصال هاب‌ها، در هر زیرشبکه چند گره انتخاب شده است که از طریق سیم به هاب مرکزی متصل شده‌اند. همچنین برای کاهش مساحت، تعداد گره‌های بی سیم در سطح دوم معماری کاهش یافته‌اند؛ به طوری که فقط هاب‌های دور از هم به صورت بی سیم با هم در ارتباط هستند.

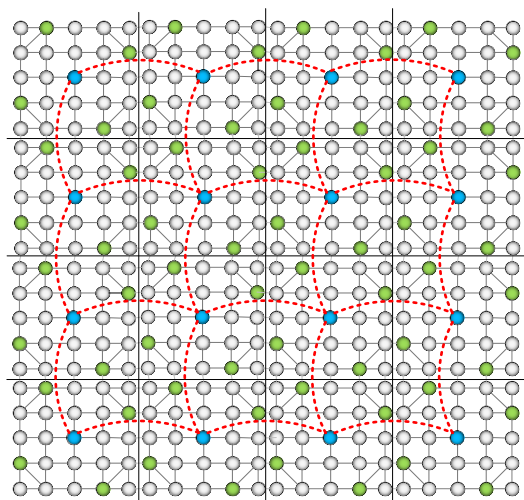
در صورت وجود خطا و ازدحام، برای جلوگیری از تبدیل شدن هاب به گلوگاه و خارج شدن زیرشبکه متصل به هاب معیوب از شبکه، از مسیریاب بی سیم افزونه استفاده می‌کنیم که این مسیریاب‌ها در سطح اول معماری پیشنهادی قرار می‌گیرند و سیستم با وجود خطا و ازدحام به عملکرد خود ادامه می‌دهد و کارایی خود را از دست نمی‌دهد.

برای داشتن یک معماری تحمل پذیر، باید یک موازنه‌ای بین مساحت و هزینه با قابلیت اطمینان ایجاد شود؛ به طوری که با کمترین افزایش مساحت و هزینه بیشترین قابلیت اطمینان و بهره‌وری به دست آید. به همین منظور برای کاهش مساحت و هزینه سربار ناشی از اضافه کردن مسیریاب‌های بی سیم افزونه در سطح اول و بهینه‌سازی معماری پیشنهادی، از ماتریس تقاضا استفاده شده است.



شکل (۱): انتخاب ترمینال و چگونگی ارتباط آنها با هاب مرکزی

برای افزایش قابلیت اطمینان شبکه، مسیریاب‌های بی‌سیم افزونه را در این سطح قرار می‌دهیم. برای پوشش خطایی که در هاب رخ می‌دهد و همچنین، برای جلوگیری ازدحام در آن، در هر زیرشبکه، یک مسیریاب بی‌سیم کمکی قرار می‌دهیم. مکان قرارگیری این گره بی‌سیم در زیرشبکه مهم است تا فاصله همه گره‌های زیرشبکه با این گره بی‌سیم کمینه شود. به علت فرود بودن تعداد گره‌ها در تمام زیرشبکه‌ها، مرکز هر زیرشبکه محل مناسب برای قرارگیری آنتن است؛ زیرا تعداد فرود بودن تعداد گره‌های زیرشبکه‌ها، پیچیدگی را کم می‌کند. شکل ۲، چگونگی ارتباط بین مسیریاب‌های بی‌سیم را در سطح اول نشان می‌دهد.



شکل (۲): چگونگی ارتباطات بین گره‌ها در سطح اول پیکربندی

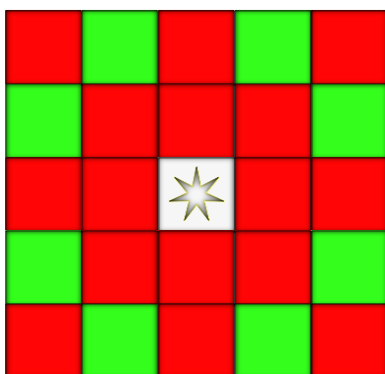
ارتباط بی‌سیم اضافی برای ارتباط با زیرشبکه‌های همسایه هستند؛ بنابراین، هاب بی‌سیم و مسیریاب بی‌سیم قابلیت انتقال بسته را از طریق ارتباط سیمی و بی‌سیم دارند. در ادامه، سطوح مختلف این معماری بیان می‌شود.

## ۲-۱-۱- سطح اول از معماری سه‌بعدی

در این کار، یک شبکه با ۴۰۰ گره بررسی می‌شود. این شبکه به ۱۶ زیرشبکه تقسیم و هر زیرشبکه در اندازه ۵×۵ ساخته می‌شود. درباره معماری هابی معمولی، هر ۲۵ گره زیرشبکه به هاب متصل می‌شوند؛ بنابراین، مساحت ارتباطات سیمی افزایش می‌یابد. برای کاهش تعداد ارتباطات، فقط ۵ گره از بین گره‌های موجود در هر زیرشبکه، به‌طور مستقیم به هاب وصل می‌شوند. این گره‌ها را به نام ترمینال می‌شناسیم. نامگذاری این گره‌ها به این علت است که مانند ترمینال بسته‌ای را از یک گره می‌گیرند و به گره دیگر تحویل می‌دهند. انتخاب مکان قرارگیری ترمینال‌ها بسیار مهم است؛ زیرا این گره‌ها باید تمام گره‌های داخل شبکه را پوشش دهند. برای اتصال گره‌های دیگر به این گره‌ها باید شرایط زیر برقرار شود:

- (۱) هر گره حداکثر به یک ترمینال وصل شود.
- (۲) فاصله هر گره تا ترمینال یک باشد.
- (۳) ماکزیمم درجه گره‌ها به جز ترمینال‌ها ۴ باشد.

با توجه به این شرایط، چگونگی ارتباط بین گره‌ها و ترمینال‌ها و همچنین ارتباط بین هاب و ترمینال‌ها در شکل ۱ نشان داده شده است. هرکدام از گره‌ها که بخواهند به هاب دسترسی داشته باشند، ابتدا باید با یکی از این ترمینال‌ها ارتباط برقرار کنند.



شکل (۳): مکان‌های ناپذیرفتنی برای وزیر بعدی

## ۲-۱-۲- سطح دوم از معماری سه‌بعدی

در سطح دوم، هاب‌های زیرشبکه‌ها به یکدیگر متصل می‌شوند. در این معماری، هر زیرشبکه ۲۵ گره دارد؛ بنابراین، اگر  $n$  تعداد تمام گره‌های شبکه باشد، تعداد هاب‌های موردنیاز برابر است با  $k=n/25$ ؛ بنابراین، تعداد هاب موردنیاز ۱۶ است. اگر ارتباط بین همه هاب‌ها از نوع بی‌سیم باشد، این مسئله به افزایش مساحت منجر خواهد شد و همچنین، توان مصرفی افزایش می‌یابد؛ بنابراین، تعداد هاب‌های بی‌سیم و مکان قرارگیری آنها نیز باید بررسی شود. براساس [30]، برای اینکه ارتباطات بی‌سیم مؤثر باشند، باید طول مسیر از ۳ گام بیشتر باشد.  $k$  تعداد هاب‌های موردنیاز است. پس تعداد هاب بی‌سیم موردنیاز برابر با  $k/4$  است. در این کار، ۴ هاب بی‌سیم لازم است. حال آنچه اهمیت دارد، مکان قرارگیری هاب‌های بی‌سیم است. به دلیل شباهت بین پیکربندی مش و صفحه شطرنج، می‌توان از مسئله چند وزیر برای مکان قرارگیری هاب‌ها استفاده کرد.

## انتخاب مکان هاب‌های بی‌سیم

در نظر گرفته می‌شود هاب‌ها مانند مربع‌های صفحه شطرنج باشند و ارتباط سیمی بین دو هاب مانند دو مربع همسایه در یک صفحه شطرنج باشد، باید گفت این مسئله برای دو یا سه وزیر تعریف نشده است. با توجه به راه‌حل مسئله چند وزیر، زمانی که اولین وزیر در صفحه قرار می‌گیرد، به دلیل اینکه وزیر به صورت افقی، عمودی و قطری حرکت می‌کند، باید هر وزیر را در طول، عرض و قطر متفاوتی قرار داد. برای وزیر بعدی، نباید آن را در جاهای ناپذیرفتنی که از قرارگرفتن نخستین وزیر به وجود آمده‌اند، گذاشت؛ به طوری که مورد تهدید وزیر قبلی نباشد. شکل ۳، جاهای ناپذیرفتنی را برای وزیر بعدی نشان می‌دهد. در این شکل، خانه‌های به رنگ سبز جاهای پذیرفتنی را برای قرارگیری وزیر بعدی نشان می‌دهد.

برای انتخاب مکان برای قرارگرفتن هاب‌های بی‌سیم و پیدا کردن بهترین مکان، از الگوریتم شبیه‌سازی سردکردن و الگوریتم ژنتیک استفاده می‌شود. فرض می‌شود وزیرها با حرف  $i$  شماره‌گذاری شده باشند که وزیر  $i$  در ردیف  $i$  قرار گرفته باشد. شماره ستونی که وزیر ردیف  $i$  در آن قرار گرفته باشد را با  $\pi(i)$  نمایش می‌دهند؛ آنگاه یک جواب به صورت  $\pi = \{\pi(1), \pi(2), \dots, \pi(n)\}$  نمایش داده می‌شود.

الگوریتم شبیه‌سازی سردکردن: در این الگوریتم از فرایند سردکردن مواد استفاده شده است. در این فرایند، یک ماده تا نقطه ذوب گرم می‌شود. سپس به آهستگی، کاهش می‌یابد. در این روش، با تغییر در جواب‌های قبلی، راه‌حل جدید تولید می‌شود. این تغییرات باعث ایجاد راه‌حل‌های بهینه است. ممکن است در اثر تغییرات، راه‌حل بدتر پذیرفته شود که احتمال این کار با کاهش دما کم می‌شود. در اولین خط از شبه کد در الگوریتم ۱، جواب اولیه با تابع تولید اعداد تصادفی ایجاد می‌شود. این تابع آرایه‌ای از اعداد صفر و یک را تولید می‌کند. در خط دوم پارامتر دما نیز مقداردهی می‌شود. در خط چهارم یک راه‌حل در همسایگی ایجاد می‌شود. برای افزایش همسایگی‌ها از توابع جابه‌جایی، بازگشت و درج‌کردن به صورت تصادفی استفاده می‌شود. راه‌حل جدید زمانی پذیرفتنی است که هزینه کمتری داشته باشد.

## الگوریتم (۱): الگوریتم SA

می‌آید.

سؤال این است که چه وقت ادامه فرآیند باید متوقف شود. برای شرط پایان پاسخ دقیقی مطرح نیست. یک پیشنهاد آن است که تعداد نسل ثابتی بررسی شود؛ برای مثال، فرآیند بالا را برای ۱۰۰۰ نسل تکرار شود و بهترین پاسخ از میان آنها انتخاب شود. پیشنهاد دیگر می‌تواند آن باشد که تا رسیدن به مقدار ارزیابی (fitness) مدنظر این فرآیند، تکرار شود.

در شکل (۴) سطح دوم معماری نشان داده شده است. در این سطح، ۱۶ هاب وجود دارد که یک مش  $4 \times 4$  را تشکیل می‌دهد و در این کار، ۴ هاب بی‌سیم لازم است و برای مکان‌گذاری این هاب‌های بی‌سیم، می‌توان از مسئله ۴ وزیر استفاده کرد.

مطابق با الگوریتم‌های سردکردن و ژنتیک فرض می‌شود در ابتدا یک پاسخ به‌طور تصادفی به‌صورت  $\pi = \{4.3.2.3\}$  ایجاد شود؛ به این معنا که اولین هاب بی‌سیم، در ردیف اول در ستون ۴ که در شکل ۴، همان گره ۴ است، قرار می‌گیرد و دومین هاب بی‌سیم، در ردیف دوم در ستون ۳ که همان گره ۷ است، قرار می‌گیرد. طبق مسئله چند وزیر، در مکان گره ۷ هاب بی‌سیم نمی‌تواند قرار بگیرد؛ زیرا مورد تهدید هاب بی‌سیم واقع در ردیف اول است؛ بنابراین، اگر در ستون ۲ قرار بگیرد، مورد تهدید نیست. پس جواب بعدی به‌صورت  $\pi = \{4.2.2.3\}$  می‌شود. با توجه به این جواب، مکان اولین و دومین هاب بی‌سیم مشخص شده است. هاب بی‌سیم سوم در ردیف سوم و ستون دوم که همان گره ۱۰ است، باید قرار بگیرد که در ردیف سوم هیچ هاب بی‌سیمی را نمی‌توان قرار داد؛ زیرا مورد تهدید دو هاب بی‌سیم قبلی است؛ پس این جواب پذیرفتنی نیست.

در این صورت یک جواب دیگر به‌صورت  $\pi = \{3.2.2.3\}$  بررسی می‌شود. بر اساس این جواب، هاب بی‌سیم اول به جای گره ۳ قرار می‌گیرد و دومین هاب بی‌سیم باید در مکان گره ۵ قرار گیرد تا مورد تهدید هاب بی‌سیم قبلی نباشد. پس جواب به‌صورت  $\pi = \{3.1.2.3\}$  می‌شود. بر اساس این جواب، سومین هاب بی‌سیم باید ردیف سوم و ستون دوم قرار بگیرد که در این صورت مورد

Input Model	
T0=1000	% Temperature
	Number of Queens
f:	Cost function
Output: The location of queens (Hubs)	
1:	Set the initial temperature(T=T0)
2:	Creat initial solution (s <sub>0</sub> )
3:	P= Calculate f (s <sub>0</sub> )
4:	while ( P>0)
5:	Creat Neighbor (s)
6:	Calculate f (s)
7:	if ( f(s)<P) then
	8: s <sub>0</sub> =s
	9: p= f(s)
	10: else
11:	Generate r: A uniform random number between 0 and 1
12:	if r < e <sup>(f(s<sub>0</sub>)-f(s))/T</sup> then
	13: s <sub>0</sub> =s
	14: p= f(s)
15:	reduce temperature
16:	return s <sub>0</sub>

الگوریتم ژنتیک: با استفاده از الگوریتم ژنتیک می‌توان

به جواب‌هایی رسید که تا حد کافی مناسب باشند. با توجه به الگوریتم ۲، مراحل الگوریتم عبارت‌اند از تولید نسل اولیه، انتخاب و عملگرهای ژنتیکی. در مرحله تولید نسل اولیه تعدادی پاسخ به‌صورت تصادفی ایجاد می‌شوند. در مرحله بعد، از نسل قبلی تعدادی از پاسخ‌ها انتخاب می‌شوند تا مولد پاسخ‌های جدید باشند. پس از انتخاب والد‌های نسل بعد، با استفاده از عملگرهای ژنتیک، نسل بعدی ایجاد می‌شود. نکته مهم اینکه تعداد پاسخ‌های هر نسل را برابر در نظر می‌گیرند و اندازه نسل را معمولاً تغییر نمی‌دهند.

دو عملگر معروف برای ایجاد نسل جدید عبارت‌اند از برش (خطوط ۹-۱۳) و جهش (خطوط ۱۴-۱۸). عمل برش اینگونه است که از ترکیب اطلاعات دو والد یک پاسخ جدید به وجود می‌آید. عمل جهش اینگونه است که مقادیر پاسخ به‌صورت تصادفی با یک احتمال (معمولاً این احتمال کم است) تغییر می‌کند و مقادیر دیگری اختیار می‌کنند؛ برای مثال، در یک نمایش دنباله بیتی می‌توان عمل جهش را به تغییر تصادفی هر کدام از بیت‌ها از یک به صفر یا برعکس تعریف کرد. شرایط پایان (خطوط ۱۹-۲۵): پس از انجام عملیات بالا یک نسل جدید از پاسخ‌ها به دست

```

15: Select Parent
16: Apply mutation
17: Evaluate Mutation
18:end
19: Create Merged Population
20:Sort population
21: Update Worst Cost
22: Truncation
23:Stor Best solution ever found
24: stor Bestevevfound
25:end
    
```

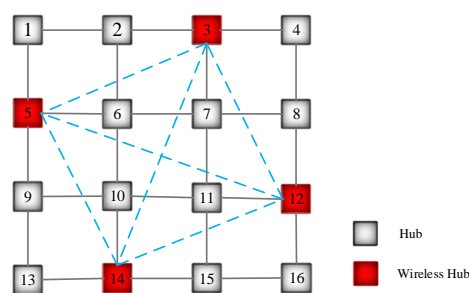
تهدید دومین هاب بی سیم است؛ اما اگر به جای گره ۱۲ قرار گیرد، مورد تهدید نیست. به همین صورت، چهارمین هاب بی سیم به جای گره ۱۴ قرار می گیرد. پس یکی از جواب های مسئله که از الگوریتم ژنتیک یا سردکردن به دست می آید، به صورت  $\pi = \{3, 1, 4, 2\}$  است که در شکل ۴ هاب های بی سیم با رنگ قرمز نشان داده شده اند. برای این مسئله راه حل های متفاوتی وجود دارد. هر کدام از راه حل های بهینه برای مکان قرارگیری هاب های بی سیم استفاده می شوند.

### ۳- بهینه سازی معماری پیشنهادی

با استفاده از ارتباط های بی سیم بین هسته ها، شبکه بی سیم روی تراشه به طور منطقی، عملکرد شبکه روی تراشه را افزایش داده است؛ با این حال، گیرنده های بی سیم به همراه آنتن مربوطه، فضا و مصرف انرژی درخور توجهی را به شبکه بی سیم روی تراشه تحمیل می کنند. در این مقاله یک معماری تحمل پذیر خطا ارائه شده که با افزودن همراهی است. در این قسمت به منظور افزایش قابلیت اطمینان معماری پیشنهادی، چندین مسیریاب بی سیم در سطح اول معماری دو سطحی فعال می شوند که در صورت معیوب شدن هاب ها، سیستم به عملکرد خود ادامه دهد؛ به طوری که کمترین افزودن را داشته باشد.

(۴) مبانی نظری و منطقی برای سیاست مسئله جایگزینی در [31] آمده است. این مسئله برنامه های مختلفی دارد. خلاصه ای از این مسئله به این صورت است:

(۵) در نظر بگیرید که  $n$  مشتری وجود دارد که هر کدام از این مشتری ها یک سطح تقاضای خاصی دارند. برای فراهم کردن خدمات برای این مشتریان،  $m$  نقطه اضافی برای مکان امکانات تعریف شده است. واضح است که استقرار هر مرکز برای فراهم کردن افزایش امکانات هزینه دارد؛ بنابراین، فقط بعضی از مراکز، از بین نقطه های اضافی برای ارائه خدمات انتخاب شده اند. با توجه به فاکتورهایی مانند هزینه باز کردن مرکز، فاصله بین مشتریان و مکان تجهیزات و سطح تقاضای مشتریان درباره یک مرکز انتخاب شده، آن مرکز باز خواهد شد؛ در غیر این صورت بسته خواهد شد. هدف اصلی این مسئله، کم کردن فاصله بین مشتریان با سطح تقاضای بالای مشتریان با مراکز و کاهش هزینه بسته



شکل (۴): مکان هاب های بی سیم

### الگوریتم (۲): الگوریتم ژنتیک

```

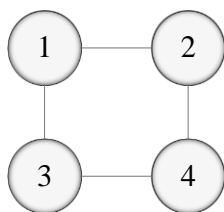
Input Model:
npop: population size
MaxIt: Maximum Number of Iteration
nc: Number of offspring
nm: Number of Mutants
Output: The location of queens (Hubs)
%% Initialization
1: for i= 1 to npop do
2: initialize: Creat Random Solution
3: Evaluation
4: end
5: Sort Population
6: Store Best Solution
7: Store Cost

%% Main Loop
8: for it=1 to MaxIt do

%%Crossover
9: for i=1 to (nc/2) do
10: Select Parents Indices
11: Select Parents
12: Apply Crossover
13: end

%%Mutation
14: for j=1 to nm do
    
```





مبدأ	۱	۲	۳	۴
مقصد	۲	۳	۴	۱

شکل (۵): یک شبکه مش ۲×۲ با یک الگوی ترافیکی فرضی

گره	۱	۲	۳	۴
سطح تقاضا	۲	۲	۳	۳

$$\text{ماتریس تقاضا} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 1 \\ 1 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 1 & 1 \\ 0 & 1 & 1 & 1 \end{bmatrix}$$

شکل (۶): ماتریس تقاضا و سطح تقاضای هر گره

در معماری پیشنهادی، از ماتریس تقاضا برای انتخاب زیرشبکه‌هایی استفاده می‌شود که محل قرارگیری مسیریاب‌های افزونه در سطح اول هستند. براساس این ماتریس، مشخص می‌شود هاب مربوط به کدام زیرشبکه، سطح تقاضای بالایی دارد و در آن زیرشبکه مسیریاب بی‌سیم افزونه را قرار می‌دهیم. براساس ماتریس تقاضا می‌خواهیم ۸ مسیریاب بی‌سیم افزونه در سطح اول قرار دهیم؛ به گونه‌ای که بهره‌وری سیستم افزایش پیدا کند و این مسیریاب‌ها را در زیرشبکه‌هایی قرار دهیم که ازدحام در آنجا بیشتر است و گره کمکی برای هاب آن زیرشبکه باشد. الگوی ترافیکی فرضی در اینجا ترافیک نقطه داغ در نظر گرفته شده است. مقصد در زیرشبکه ۱۱ قرار دارد؛ یعنی تمام گره‌های شبکه، مقصدشان گره‌ای است که در زیرشبکه ۱۱ قرار دارد. شکل ۷، ماتریس تقاضای این شبکه را نشان می‌دهد. تمام زیرشبکه‌ها مبدأ هستند؛ پس تمام درایه‌های قطر اصلی ماتریس برابر یک است. براساس این الگوی ترافیکی، زیرشبکه ۱۱ مقصد تمام زیرشبکه‌ها است؛ پس تمام درایه‌های سطر ۱۱ نیز برابر یک است. با استفاده از الگوریتم DoR، گره‌هایی که در مسیر انتقال بسته از مبدأ

شدن مرکز است.

در این مقاله که حل مشکل بالاست، سعی شده است تا فاصله محل آنتن با عنصرهای پردازشی با سطح تقاضای بالا حداقل شود. براساس نتایج و مطالعات انجام‌شده [22,33,34]، به نظر می‌آید به علت فردبودن تعداد گره‌ها در تمام زیرشبکه‌ها مرکز هر زیرشبکه محل مناسب برای قرارگیری آنتن است. مسئله اینجاست که این مسیریاب بی‌سیم در مرکز کدام زیرشبکه قرار گیرد تا بهره‌وری شبکه افزایش پیدا کند.

۶) براساس تعریف ماتریس سطح تقاضای هر گره که در [32] بیان شده است، ابتدا صفر در نظر گرفته می‌شود و با وجود شرایط زیر، مقدار آن افزایش پیدا می‌کند. شرایط به‌صورت زیر بیان می‌شود:

۱) گره به عنوان مبدأ تعریف شده باشد.

۲) گره در مسیر انتقال بسته دیده شود.

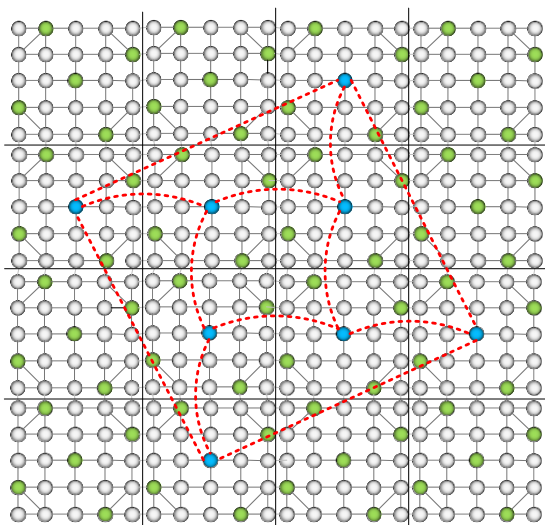
۳) گره به‌عنوان گره مقصد تعریف شده باشد.

اگر این روش به همه گره‌های شبکه اعمال شود، درنهایت یک ماتریس تقاضا تشکیل شده است که مقدار مجموع روی ردیف نام ماتریس، سطح تقاضای آن گره خواهد بود. اگر تعداد گره‌های یک شبکه  $n$  باشد، ماتریس تقاضا  $n \times n$  خواهد بود. برای روشن‌شدن این مسئله، شکل ۵ یک مثال ساده‌ای از یک شبکه با توپولوژی مش ۲×۲ است که در مجموع، ۴ گره دارد و همچنین، یک الگوی ترافیکی فرضی قرار داده شده است.

براساس ترافیک داده‌شده، همه گره‌های شبکه، مبدأ هستند؛ پس درایه‌های روی قطر اصلی ماتریس باید برابر یک باشند. گره ۱ به‌عنوان مقصد گره ۴ تعریف شده است؛ در نتیجه، در ماتریس درایه (۱،۴) باید یک باشد. با استفاده از الگوریتم DoR، برای انتقال یک بسته از گره ۲ به گره ۳، گره ۴ ملاقات می‌شود؛ بنابراین درایه (۴،۲) باید یک شود. در شکل ۶، ماتریس تقاضا مربوط به شبکه شکل ۵ و الگوی ترافیکی فرضی آن آمده است. سطح تقاضای هر گره نیز مجموع هر ردیف ماتریس است. در این مثال گره‌های ۳ و ۴ بیشترین تقاضا را دارند؛ یعنی ازدحام در این گره‌ها بیشتر است. این ماتریس در مدل ورودی ذخیره شده است.

1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
0	1	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
1	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
0	0	0	0	0	1	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
1	1	1	1	1	0	0	0	0	0	1	1	1	1	1	0	0	0	0	0
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1	0	0	0	0	0
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1

شکل (۷): ماتریس تقاضا و سطح تقاضای هر هاب



شکل (۸): بهینه‌سازی سطح اول معماری

به مقصد قرار دارند، مشخص می‌شود و به این صورت درایه‌های دیگر ماتریس صفر یا یک می‌شوند.

براساس ماتریس تقاضا در شکل ۷، سطح تقاضای هر گره محاسبه شده است. گره‌های بی‌سیم به همراه گره‌های ۷، ۱۰ و ۱۱ بیشترین سطح تقاضا را دارند. سطح تقاضای بقیه گره‌ها یک است که یکی از این زیرشبکه‌ها برای فعال کردن مسیریاب بی‌سیم باید انتخاب شود. به دلیل اینکه زیرشبکه‌های بالاتر از زیرشبکه ۱۱، فاصله بیشتری تا این زیرشبکه دارند، زیرشبکه ۶ انتخاب می‌شود. شکل ۸، مسیریاب‌های بی‌سیم فعال در زیرشبکه‌های مربوطه در سطح اول معماری را نشان می‌دهد. در این صورت تعداد مسیریاب‌های بی‌سیم کاهش می‌یابد و بقیه مسیریاب‌های بی‌سیم در زیرشبکه‌های دیگر غیرفعال می‌شود.

#### ۴- انتشار اطلاعات ازدحام و خطا در هاب

در شبکه‌ها و الگوریتم‌های مسیریابی بدون ازدحام، تصمیمات مسیریابی بسته‌ها مستقل از شرایط ازدحام در شبکه انجام می‌شود؛ در این صورت، ممکن است توازن بار را مختل کند؛ زیرا وضعیت ترافیک شبکه در زمان مسیریابی بسته‌ها در نظر گرفته نشده است.

در الگوریتم‌های مسیریابی آگاه از ازدحام، مسیر بسته‌ها با توجه به شرایط ترافیک کانال‌های شبکه تعیین می‌شود. در شبکه‌های بی‌سیم روی تراشه به علت اشتراک‌گذاری هاب‌ها در بین هسته‌های یک زیرشبکه، هاب‌ها در معرض ازدحام قرار می‌گیرند؛ در نتیجه، تأخیر افزایش می‌یابد و ممکن است بعضی از بسته‌ها در اثر ازدحام از بین بروند و هیچ‌گاه به مقصد نرسند. اگر بافر انتقال داده به مرحله بحرانی برسد، به طوری که اگر بسته جدیدی وارد بافر شود، بافر انتقال داده سرریز می‌کند و بسته‌ها از بین می‌روند، در این صورت در هاب ازدحام رخ داده است.

در [35]، برای توصیف درجه احتقان در بافر انتقال داده از  $\eta$  استفاده شده است که از رابطه (۱) به دست می‌آید:

$$\eta = \frac{N}{D} \quad (1)$$

$N$  تعداد فلیت‌های ذخیره‌شده در بافر انتقال داده و  $D$  عمق بافر است. براساس این رابطه هرچه  $\eta$  بزرگ‌تر شود، ازدحام بیشتر می‌شود. با توجه به [35]، از  $\Delta$  برای نشان‌دادن آستانه ازدحام که مقدار بحرانی بافر را نشان می‌دهد، استفاده شده است و مقدار این پارامتر از طریق چندین شبیه‌سازی به دست می‌آید؛ زیرا اگر بسیار کوچک در نظر گرفته شود، هاب خیلی زود در معرض ازدحام قرار می‌گیرد و اگر نزدیک به یک در نظر گرفته شود، ممکن است بعضی از بسته‌ها از بین بروند.

گره	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16
سطح تقاضا	1	1	3	1	2	1	3	1	1	2	16	8	1	2	1	1

شبکه استفاده کرد. در اینجا از الگوریتم مسیریابی مبتنی بر جدول Q-table برای مسیریابی بین زیرشبکه‌ها استفاده شده است. زمانی که مبدأ و مقصد در یک زیرشبکه باشند، بسته با الگوریتم مسیریابی XY به مقصد ارسال می‌شود؛ اما اگر مبدأ و مقصد در یک زیرشبکه نباشند، دو حالت در نظر گرفته می‌شود:

- حالت اول: زمانی که در هاب ازدحام یا خطا وجود ندارد و مقدار  $\varphi = 0$  است.
- حالت دوم: زمانی که در هاب ازدحام یا خطا اتفاق بیفتد و مقدار  $\varphi = 1$  است.

در هر گره یک جدول به نام Q-table مطابق جدول ۲، که برای گره صفر در نظر گرفته شده است، ذخیره می‌شود. از این جدول برای مسیریابی بین زیرشبکه‌ها استفاده می‌شود. براساس این جدول، زمانی که خطا یا ازدحام وجود ندارد، گره صفر ترمینال نیست. گره ترمینال همسایه پایینی این گره است. زمانی که خطا یا ازدحام وجود دارد، در صورت فعال بودن مسیریاب بی‌سیم در مرکز زیرشبکه، بسته به سمت شرق ارسال می‌شود. اگر مسیریاب بی‌سیم فعال نباشد، از طریق سیمی به مقصد ارسال می‌شود. اندازه این جدول نسبت به جداول Look up table بسیار کوچک است.

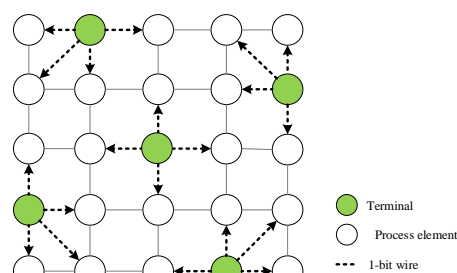
جدول (۲): Q-table

	$\varphi = 0$	$\varphi = 1$
Output port	South	East

### ۵-۱- مسیریابی در حالت اول

زمانی که گره مبدأ و گره مقصد در یک زیرشبکه نباشند، فاصله بین گره مبدأ تا مقصد که شامل مسیر هابی و مسیر بدون هاب است، محاسبه می‌شود. با توجه به الگوریتم ۳، (خطوط ۱۵-۶) اگر مسیرهایی کوتاه‌تر باشد، از همین مسیر برای ارسال بسته استفاده می‌شود. اگر گره فعلی ترمینال نباشد، با استفاده از جدول Q-table، بسته به سمت ترمینال و سپس به هاب ارسال می‌شود در غیر این صورت، بسته به سمت هاب ارسال می‌شود؛ اما اگر مسیر سیمی کوتاه‌تر

برای نشان دادن مشخصه ازدحام از  $\varphi$  استفاده شده است. اگر  $\eta \geq \Delta$  باشد، بافر انتقال داده به مرحله بحرانی رسیده است و هاب از ازدحام رنج می‌برد؛ پس مقدار  $\varphi$  برابر با یک می‌شود و اگر  $\eta < \Delta$  باشد، مقدار  $\varphi$  صفر در نظر گرفته می‌شود. ترمینال‌ها از طریق یک سیم تک‌بیتی مقدار  $\varphi$  هاب را دریافت می‌کنند و سپس مقدار  $\varphi$  را از طریق سیم تک‌بیتی به چهار گره دیگر ارسال می‌کنند. زمانی که هاب مربوط به یک زیرشبکه خراب شود، مانند شرایط ازدحام در هاب، مقدار  $\varphi$  برابر با یک می‌شود. ترمینال‌ها همانند شرایط ازدحام، مقدار  $\varphi$  را در سراسر زیرشبکه منتشر می‌کنند تا گره‌های درون زیرشبکه از معیوب بودن ترمینال مرکزی آگاه شوند تا بسته‌های داده را به تانتستمت ترمینال‌ها ارسال نکنند. شکل ۹ نحوه انتشار مقدار  $\varphi$  را در شبکه نشان می‌دهد.



شکل (۹): چگونگی انتشار اطلاعات تراکم و خطا

### ۵-۲- الگوریتم مسیریابی پیشنهادی

الگوریتم خوشه‌بندی که براساس تقسیم شبکه به مجموعه‌ای از گره‌ها در شرایط خاص است، برای حل مشکلات شبکه استفاده می‌شود. الگوریتم‌های خوشه‌بندی برای برآوردن اهداف خاص بسته به زمینه‌ای که خوشه در آن استفاده شده است، طراحی شده‌اند. خوشه‌بندی می‌تواند ایستا یا پویا باشد؛ در خوشه‌بندی ایستا شکل و اندازه خوشه در زمان اجرا تغییر نمی‌کند؛ ولی در خوشه‌بندی پویا اندازه خوشه در زمان اجرا تغییر می‌کند. در این مقاله هر زیرشبکه به عنوان یک خوشه در نظر گرفته شده است؛ در این صورت خوشه‌بندی ایستا است؛ زیرا اندازه خوشه‌ها تغییر نمی‌کند؛ به همین دلیل می‌توان از الگوریتم‌های مسیریابی مربوط به مسیریابی بین خوشه‌های

خروج خود را از شبکه به تمام گرهای زیرشبکه محلی از طریق ترمینال‌ها، اعلام می‌کند. در این صورت جای خود را به مسیریاب بی‌سیم در مرکز زیرشبکه می‌دهد.

با توجه به الگوریتم ۳ (خطوط ۱۹-۱۶)، گرهای بسته‌های خود را با استفاده از جدول Q-table به سمت مسیریاب بی‌سیم هدایت می‌کنند. زمانی که بسته‌ها به مسیریاب بی‌سیم ارسال می‌شوند، مسیریاب بی‌سیم، بسته‌ها را با ارتباط بی‌سیم به نزدیک‌ترین زیرشبکه مقصد ارسال می‌کند. اگر مقصد در همان زیرشبکه‌ای باشد که هاب مرکزی آن بی‌سیم است، با الگوریتم XY به سمت مقصد هدایت می‌شود؛ اما اگر مقصد در زیرشبکه همسایه باشد، اگر هاب مرکزی آن زیرشبکه دچار خطا یا ازدحام نشده باشد، بسته از طریق هاب به مقصد هدایت می‌شود.

#### الگوریتم (۳): الگوریتم مسیریابی پیشنهادی

```

Input: Source-Subnet-Number(S), Destination-Subnet-Number(D)
Output: Routing path
Begin
1.  $H_{hub}$  : Distance between source and destination using Hub
2.  $H_{non-hub}$  : Distance between source and destination without using Hub
3. if (S == D) then
4.     using XY routing algorithm;
5. else
6.     if (( $H_{hub} < H_{non-hub}$ ) & ( $\varphi == 0$ )) then
7.         if (Current node is not terminal)
8.             Send packet to the terminal;
9.             Send packet from terminal to the hub;
10.        else
11.            Send packet to the hub;
12.        end;
13.     else if (( $H_{hub} > H_{non-hub}$ ) & ( $\varphi == 0$ ))
14.         then
15.             using XY routing algorithm;
16.             else if ( $\varphi == 1$ ) then
17.                 Send packet to the wireless_router;
18.             end;
19. end;
    
```

#### ۶- ارزیابی معماری پیشنهادی

برای ارزیابی معماری پیشنهادی، از ابزار شبیه‌سازی

باشد، بسته با الگوریتم مسیریابی XY به سمت مقصد فرستاده می‌شود. در ادامه چگونگی محاسبه مسیرها بیان شده است.

مسیر بین گره مبدأ و مقصد از طریق هاب: در بدترین حالت، گره مبدأ و مقصد ترمینال نیستند و در زیرشبکه‌ای قرار دارند که هاب مرکزی آنها نیز بی‌سیم نیست. گره مبدأ یک گام تا ترمینال فاصله دارد و ترمینال مستقیماً به هاب متصل است؛ پس فاصله مبدأ تا هاب مرکزی ۲ است.

طبق معماری سلسله‌مراتبی، هاب مرکزی در صورتی که خودش بی‌سیم نباشد، با هاب بی‌سیم یک گام فاصله دارد؛ این هاب مرکزی بی‌سیم با یک گام به هاب مرکزی بی‌سیم دیگر که در همسایگی هاب زیرشبکه مقصد قرار دارد، فاصله دارد. اکنون فاصله بین گره مبدأ تا هاب بی‌سیم در همسایگی زیرشبکه مقصد، ۴ گام است. فاصله هاب بی‌سیم تا هاب مرکزی زیرشبکه مقصد، یک گام است و هاب مرکزی به ترمینال مستقیماً متصل است و گره مقصد نیز به این ترمینال متصل است که در مجموع فاصله بین گره مبدأ تا مقصد  $H_{hub} = ۷$  می‌شود. در حالت‌های دیگر فاصله بین مبدأ تا مقصد از ۷ بیشتر نیست؛ بلکه کمتر از این مقدار است.

مسیر بین گره مبدأ و مقصد بدون استفاده از هاب: برای به دست آوردن این فاصله، یک شبکه مش دو بعدی با ۴۰۰ گره در نظر گرفته می‌شود و مختصات گره مبدأ  $(X_s, Y_s)$  و گره مقصد  $(X_d, Y_d)$  است. فاصله بین گره مبدأ و مقصد از رابطه (۲) به دست می‌آید:

$$H_{non-hub} = |X_d - X_s| + |Y_d - Y_s| \quad (2)$$

#### ۵-۲- مسیریابی در حالت دوم

زمانی که مقدار  $\varphi$  برابر با یک می‌شود، نمی‌توان از هاب مرکزی برای ارسال بسته‌هایی استفاده کرد که گره مبدأ و مقصد آنها در یک زیرشبکه قرار ندارند. برای جلوگیری از سه نوع خطای گذرا، متناوب و پایدار از تکنیک افزونگی استفاده می‌شود. در این معماری پیشنهادی از تکنیک افزونگی سخت‌افزاری استفاده شده است. زمانی که هاب به هر علت از دسترس خارج می‌شود، با یک سیم تک‌بیتی

جدول (۴): الگوهای ترافیکی

	Burstiness	Injection	Hop distance
3tc0	Moderate	Hot-spot	Local
3tc1	High	Hot-spot	Local
3tc2	Moderate	Evened-out	Local
3tc3	High	Evened-out	Local
3tc4	Moderate	Hot-spot	Long distance
3tc5	High	Hot-spot	Long distance
3tc6	Moderate	Evened-out	Long distance
3tc7	High	Evened-out	Long distance

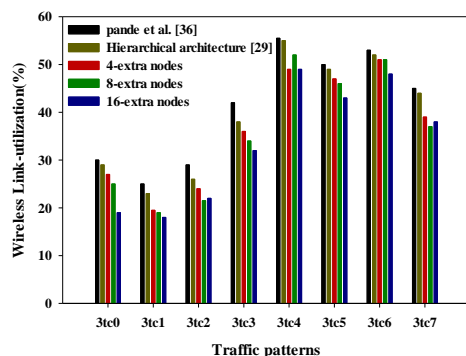
### ۶-۱- ارزیابی استفاده از ارتباط

گره‌های بی‌سیم بین چندین گره به اشتراک گذاشته می‌شوند. به دلیل استفاده زیاد از آنها، منابعی آسیب‌پذیرند؛ بنابراین، استفاده از ارتباط بی‌سیم، بسیار مهم است. این پارامتر مهم از رابطه (۳) به دست آمد:

$$\text{Link utilization} = \frac{\text{Busy time}}{\text{Total time}} * 100 \quad (3)$$

**Busy time**، مدت زمانی که از کانال استفاده می‌شود و **Total time**، زمان کل شبیه‌سازی است.

شکل ۱۰ استفاده از ارتباط‌های بی‌سیم در معماری پیشنهادی با تعداد گره‌های کمکی متفاوت، معماری سلسله‌مراتبی و معماری pande و همکارانش را نشان می‌دهد. براساس نتایج به‌دست‌آمده، استفاده از ارتباط‌های بی‌سیم، دلیل بر این نیست که همیشه تأخیر نیز کاهش پیدا می‌کند، بلکه ممکن است استفاده از ارتباط‌های بی‌سیم باعث افزایش ازدحام و در نتیجه، افزایش تأخیر شود. این نمودار نشان می‌دهد هرچه تعداد گره‌های بی‌سیم کمکی بیشتر شود، ترافیک در کل شبکه توزیع می‌شود؛ در نتیجه، باعث کاهش ازدحام و تأخیر می‌شود.



شکل (۱۰): استفاده از ارتباط بی‌سیم در الگوهای ترافیکی

OMNET++ با پکیج HNoC استفاده شده است [37,18]. شبیه‌ساز با پیاده‌سازی مسیریاب و ارتباط‌های بی‌سیم، توسعه داده شده است. در جدول ۳، پارامترهای استفاده‌شده برای آنالیز آورده شده‌اند. روش پیشنهادی با معماری‌های پیشنهادی در مرجع [29] - که از آن به‌عنوان معماری سلسله‌مراتبی - و معماری پیشنهادی در مرجع [36] - که از آن به‌عنوان معماری پاند و همکارانش یاد می‌شود - مقایسه شده است.

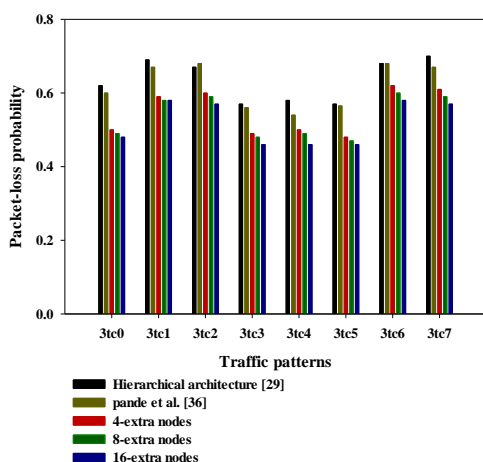
جدول (۳): پارامترهای شبیه‌سازی

Parameters	Setting
Frequency	1 GHz
Technology	65nm
Number of cores on a chip	۴۰۰
Wireless channel bandwidth	32Gbps
Switching technique	Wormhole
Number of wireless hob	4
Flit width	32 bits

در این مقاله، از الگوی ترافیکی معرفی‌شده در مرجع [18] استفاده شده است. این الگوی ترافیکی بسیار شبیه به برنامه واقعی است. برای تولید یک الگوی ترافیکی نزدیک به برنامه واقعی نیاز به داشتن سه پارامتر مهم است. سه پارامتر مهم عبارت‌اند از: پشت‌سرهم<sup>۱</sup>، تزریق<sup>۲</sup> و فاصله گامی<sup>۳</sup>.

پارامتر پشت‌سرهم، مدل‌کردن فرکانس است. در مدل‌کردن این ویژگی، از یک پارامتر به نام Hurst استفاده شده که مقدار آن بین ۰.۵ تا ۱ است. در این مقاله، پارامتر پشت‌سرهم با مقدار  $H=0.65$  که سطح moderate و  $H=0.9$  که سطح High نامیده می‌شود، مدل شده است. از پارامتر تزریق برای مدل‌کردن تعداد بسته‌های تزریق‌شده به شبکه استفاده شده است. این پارامتر در دو مود نقطه داغ<sup>۴</sup> و ترمیم‌شده<sup>۵</sup> است. پارامتر فاصله گامی یعنی فاصله بین گره مبدأ تا مقصد است که در دو مود فاصله زیاد<sup>۶</sup> و محلی<sup>۷</sup> است. این پارامترها در جدول ۴ لیست شده‌اند.

در این مقاله، پارامترهای تأخیر، توان مصرفی و استفاده از ارتباط<sup>۸</sup> و احتمال از دست رفتن بسته<sup>۹</sup> ارزیابی شده‌اند.



شکل (۱۲): احتمال از دست رفتن بسته

### ۳-۶- ارزیابی تأخیر

میانگین تأخیر بسته، یکی از مهم‌ترین پارامترهایی است که کارایی الگوریتم مسیریابی و معماری را مشخص می‌کند. براساس نمودار الف در شکل‌های ۲۰-۱۳، این نکته برداشت می‌شود که در تمام الگوهای ترافیکی میزان تأخیر برای معماری پیشنهادی کاهش یافته است. استفاده از گره‌های کمکی در سطح اول معماری، باعث کاهش ازدحام شده است که در این صورت بسته‌ها مدت طولانی در بافر انتقال داده منتظر نمی‌مانند. همچنین، براساس انتخاب مسیر کوتاه‌تر بین گره مبدأ و مقصد، میانگین شمارش گام‌ها کاهش می‌یابد و در مجموع، باعث کاهش تأخیر می‌شود. حداکثر بهبود تأخیر با هر تعداد گره کمکی، به‌طور میانگین با مقدار ۴۵٪ در ترافیک 3tc4 رخ داده است.

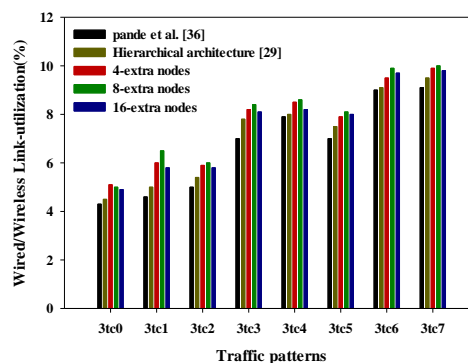
### ۴-۶- ارزیابی توان عملیاتی

نمودار ب در شکل‌های ۲۰-۱۳ مربوط به پارامتر توان عملیاتی است که مقدار این پارامتر از رابطه (۴) به دست می‌آید:

$$\text{Throughput} = \frac{\text{Average of recieved packets}}{\text{simulation time}} \quad (4)$$

طبق این رابطه، تعداد بسته‌های دریافت‌شده در معماری پیشنهادی، نسبت به معماری سلسله‌مراتبی افزایش یافته است، زیرا با استفاده از گره‌های کمکی، بسته‌ها در اثر

براساس شکل ۱۱، مجموع استفاده از ارتباط‌های بی‌سیم و سیمی در معماری پیشنهادی بیشتر از معماری سلسله‌مراتبی و معماری pande و همکارانش است. در واقع الگوریتم مسیریابی پیشنهادی علاوه بر اینکه از ازدحام جلوگیری می‌کند، باعث ایجاد تعادل بین ارتباط‌های سیمی و بی‌سیم می‌شود. در معماری پیشنهادی انتظار می‌رود هرچه تعداد گره‌های کمکی در سطح اول بیشتر شود، میانگین استفاده از ارتباط‌های بی‌سیم و سیمی نیز افزایش یابد؛ اما در نمودار شکل ۱۱، معماری پیشنهادی با ۱۶ گره کمکی، کاهش یافته است؛ زیرا با توجه به الگوی ترافیکی، از بعضی از ارتباطات استفاده نمی‌شود و بدین ترتیب مقدار آن پارامتر صفر منظور می‌شود؛ در این صورت، میانگین استفاده از ارتباط برای شبکه کاهش می‌یابد.



شکل (۱۱): میانگین استفاده از ارتباط بی‌سیم و سیمی در الگوهای ترافیکی

### ۲-۶- احتمال از دست رفتن بسته

در معماری سلسله‌مراتبی و معماری pande و همکارانش قابلیت اطمینان و ازدحام در نظر گرفته نشده است. در این نوع معماری‌ها با وجود ازدحام، هاب‌ها تبدیل به گلوگاه می‌شوند و در صورت بروز خطا، تمام گره‌های زیرشبکه از شبکه خارج می‌شوند؛ زیرا هیچ ارتباطی با زیرشبکه‌های دیگر ندارند. شکل ۱۲، نمودار از دست رفتن بسته در شرایط وجود ازدحام و خطا را در یکی از هاب‌های بی‌سیم نشان می‌دهد. همان‌طور که مشاهده می‌شود این احتمال کاهش پیدا کرده و معماری به‌خوبی عمل کرده است.

ارائه یک ساختار خطاپذیر مبتنی بر تقاضا برای معماری سه‌بعدی شبکه‌های بی‌سیم روی تراشه

قطع می‌شود و از شبکه خارج می‌شوند؛ بنابراین، باید از مکانیزم‌های خاصی برای جلوگیری از انتقال بیش از حد بسته‌ها به سمت گره‌های بی‌سیم استفاده شود.

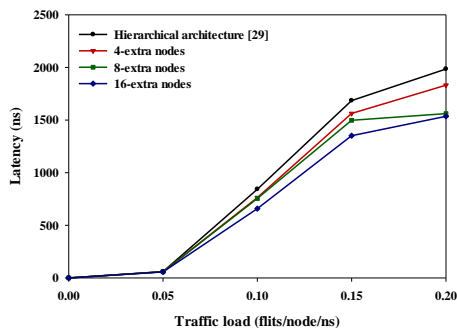
در این مقاله یک معماری دو سطحی آگاه از ازدحام با قابلیت تحمل‌پذیری خطا ارائه شده است. استفاده از گره‌های کمکی در سطح اول، تأثیر چشمگیری در کاهش تأخیر دارد و علاوه بر کاهش ازدحام، استفاده از ارتباط سیم و بی‌سیم را متعادل می‌کند. نتایج ارزیابی، بهبود درخور توجهی در پارامترهای تأخیر، توان عملیاتی، احتمال از دست رفتن بسته و استفاده از ارتباط را نشان می‌دهد.

در کارهای آینده، معماری و الگوریتم مسیریابی پیشنهادی در این مقاله، می‌تواند با رویکردهای دیگر ترکیب شوند. علاوه بر این، اطلاعات ازدحام با استفاده از ویژگی‌های منحصربه‌فرد کانال‌های بی‌سیم مانند خاصیت پخش در زیرشبکه‌های مختلف منتشر شود.

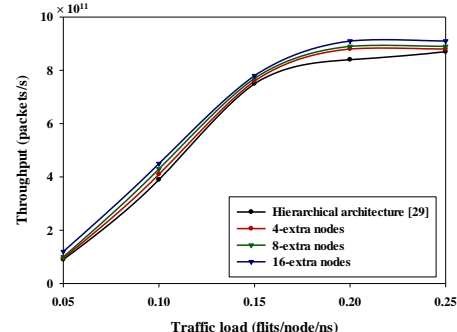
ازدحام یا خطا از بین نمی‌روند و به مقصد می‌رسند و همچنین، با کاهش زمان انتظار در بافر انتقال داده و انتخاب مسیر کوتاه، تعداد بسته‌های بیشتری در کل زمان دریافت می‌شود؛ در نتیجه، مقدار این پارامتر افزایش می‌یابد و معماری پیشنهادی با هر تعداد گره کمکی در عملکرد عملیاتی بهبود بیشتری دارد. حداکثر بهبود توان عملیاتی با حدود ۱۵٪ در ترافیک 3tc0 رخ داده است.

### ۷- نتیجه‌گیری

با توجه به اینکه تعداد کانال‌های بی‌سیم محدود است و آنها در میان تمام عناصر پردازشی مشترک‌اند، استفاده بهینه از این منابع ارزشمند است. در صورتی که تعداد زیادی بسته بخواهد از طریق کانال‌های بی‌سیم عبور کنند، در گره‌های بی‌سیم و گره‌های مجاور آنها ازدحام رخ می‌دهد و به کاهش کارایی منجر می‌شود. همچنین، در صورت خطا در گره‌های بی‌سیم، ارتباط بعضی از گره‌ها با گره‌های دیگر

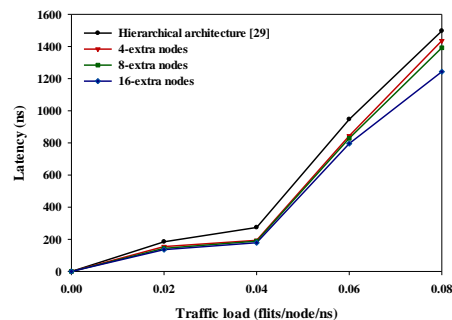


(الف)

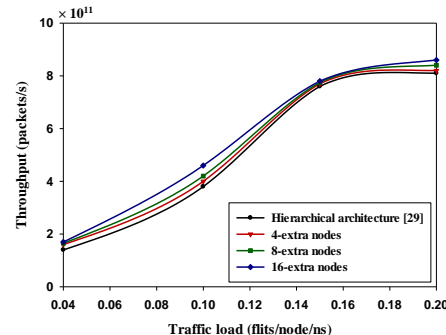


(ب)

شکل (۱۳): مقایسه الف) تأخیر و ب) توان عملیاتی در الگوی ترافیکی 3tc0

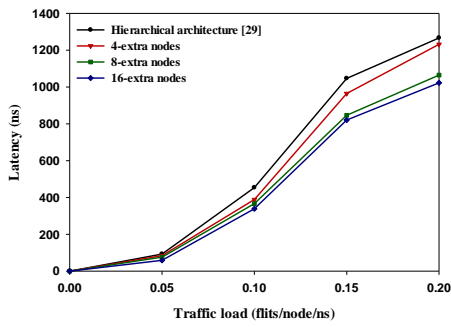


(الف)

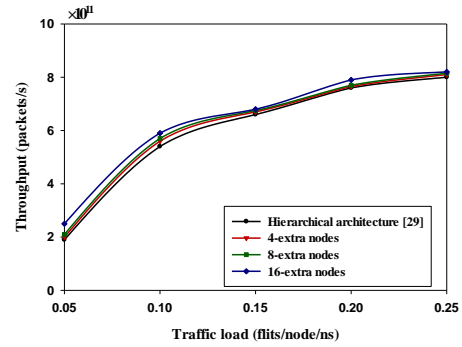


(ب)

شکل (۱۴): مقایسه الف) تأخیر و ب) توان عملیاتی در الگوی ترافیکی 3tc1

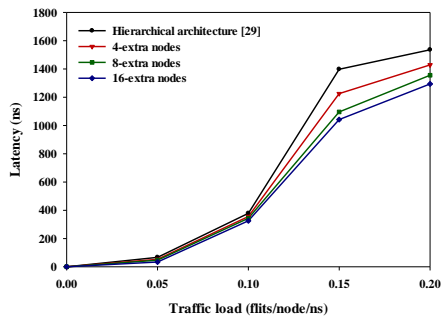


(الف)

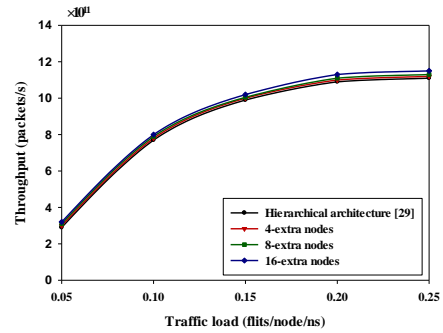


(ب)

شکل (۱۵): مقایسه الف تاخیر و ب توان عملیاتی در الگوی ترافیکی 3tc2

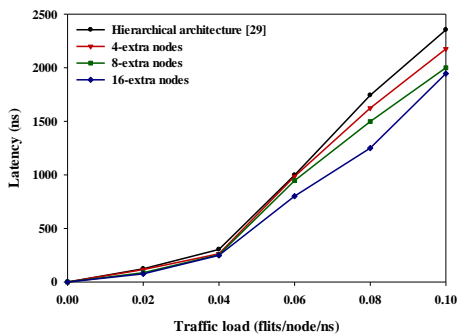


(الف)

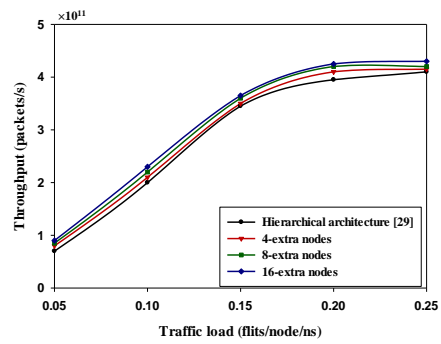


(ب)

شکل (۱۶): مقایسه الف تاخیر و ب توان عملیاتی در الگوی ترافیکی 3tc3



(الف)

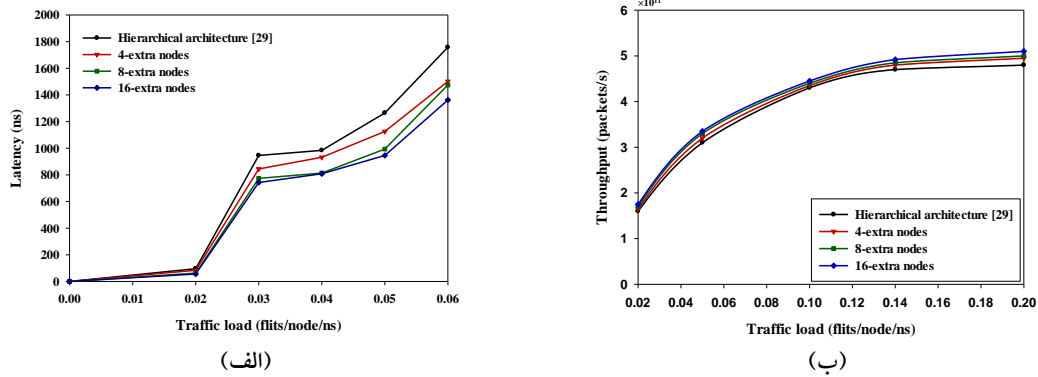


(ب)

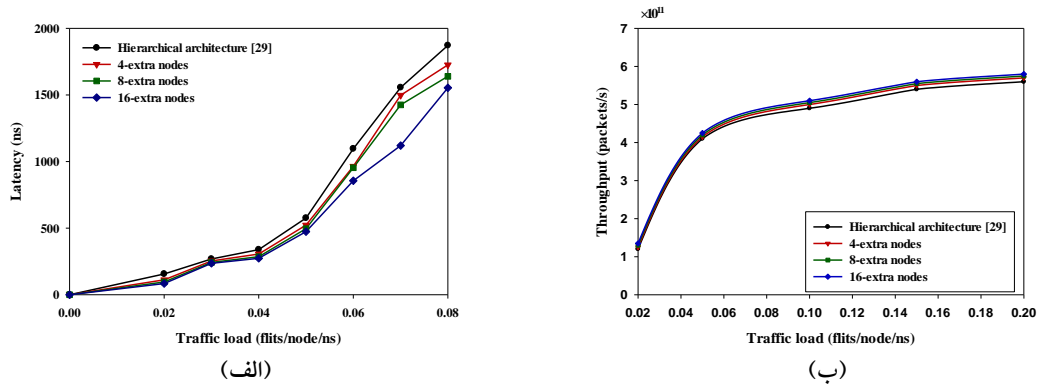
شکل (۱۷): مقایسه الف تاخیر و ب توان عملیاتی در الگوی ترافیکی 3tc4



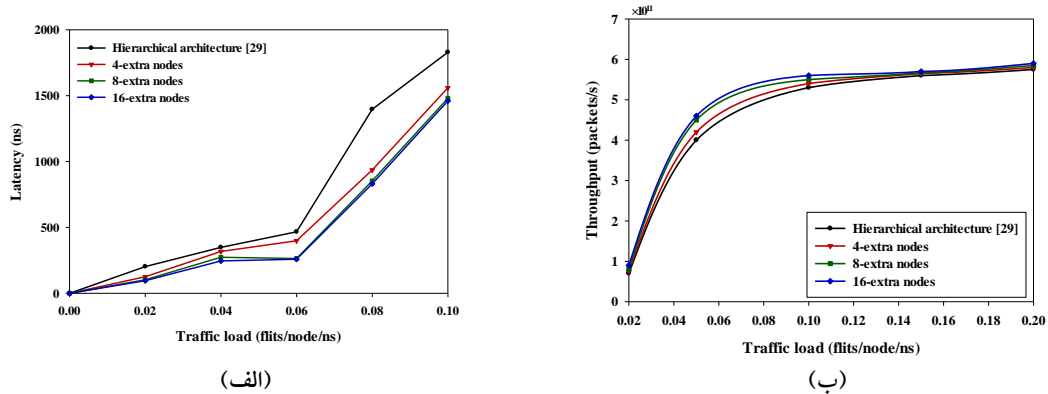
ارائه یک ساختار خطاپذیر مبتنی بر تقاضا برای معماری سه‌بعدی شبکه‌های بی‌سیم روی تراشه



شکل (۱۸): مقایسه الف) تأخیر و ب) توان عملیاتی در الگوی ترافیکی 3tc5



شکل (۱۹): مقایسه الف) تأخیر و ب) توان عملیاتی در الگوی ترافیکی 3tc6



شکل (۲۰): مقایسه الف) تأخیر و ب) توان عملیاتی در الگوی ترافیکی 3tc7

## مراجع

- Sah, P. P. Pande, "Performance evaluation and design trade-offs for wireless network-on-chip architectures", ACM Journal on Emerging Technologies in Computing Systems (JETC), Vol. 8, No. 3, 2012.
- [12] P. Wettin, J. Murray, R. Kim, X. Yu, P. P. Pande, D. Heo, "Performance evaluation of wireless NoCs in presence of irregular network routing strategies", In Design, automation and test in Europe conference and exhibition (DATE), pp.1–6, 2014.
- [13] V. F. Pavlidis, E. G. Friedman, "3-D topologies for networks-on-chip", IEEE Transactions on Very Large Scale Integration (VLSI) Systems, Vol. 15, No.10, pp.1081–1090, 2007.
- [14] A. Dehghani, K. Jamshidi, "A novel approach to optimize fault-tolerant hybrid wireless network-on-chip architectures", ACM Journal on Emerging Technologies in Computing Systems (JETC), Vol. 12, No. 4, 2016.
- [15] A. Dehghani, K. Jamshidi, "A fault-tolerant hierarchical hybrid mesh-based wireless network-on-chip architecture for multicore platforms". The Journal of Supercomputing, Vol. 71, No. 8, pp. 3116–3148, 2015.
- [16] A. Shacham, K. Bergman, L. P. Carloni, "Photonic networks-on-chip for future generations of chip multiprocessors", IEEE Transactions on Computers, Vol. 57, No. 9, pp. 1246–1260, 2008.
- [17] S. Oliveira, G.E. P.lima, M. M.pereira, M. E.kreutz, B.M. Carvalho, "Mapping wired links in a Hybrid wired-wireless Network-on-Chip", Brazilian Symposium on Computing Systems Engineering (SBESC), 2020.
- [18] S.M. Mamaghani, M.A. Jabraeil Jamali, "An adaptive congestion-aware routing algorithm based on network load for wireless routers in wireless network-on-chip", International Journal of Electronics and Communications, 2018.
- [19] Y. Ouyagu, Qi. Wang, M. Ru, H. Liang, J. Li, "A novel low- latency regional fault-aware fault-tolerant routing algorithm for wireless NoC", IEEE access, Vol. 29, No. 8, 2020.
- [20] U. Y. Ogras, R. Marculescu, "It's a small world afterall: NoC performance optimization via long-range link insertion", IEEE Transactions on Very Large Scale Integration (VLSI) Systems, Vol. 14, No. 7, pp. 693–706, 2006.
- [21] B. Bahrami, M. A. J. Jamali, S. Saedi, "A hierarchical architecture based on traveling
- [1] Z. Shirmohammadi, M. Farmani, H. ZamaniSabzi, "Priority Filt: A Way to Increase Network Reliability on Chip against Soft Error by Considering Multiple Bit Upset", Computational Intelligence in Electrical Engineering, Vol. 12, No. 3, pp. 19-32, 2021.
- [2] S.A. Alavi, S.J. SeyyedMahdaviChabok, "Performance and Reliability Improvement on 2D-NoC Based on Reducing the Numbber of Passing Links", Computational Intelligence in Electrical Engineering, Vol. 11, No. 3, pp. 95-106, 2020.
- [3] K. Tatas, K. Siozios, D. Soudris, A. Jantsch, "Designing 2D and 3D Network-on-Chip Architectures, Springer Publishing", 2014.
- [4] A. Rezaei, D. Zhao, M. Daneshtalab, H. Zhou. "Multiobjective task mapping approach for wireless NoC in dark silicon age", In International conference on parallel, distributed and network-based processing (PDP), pp. 589–592, 2017.
- [5] V. Pavlidis, E. Friedman, "3-D Topologies for Networks-on-Chip", in: IEEE International SOC Conference, pp. 285-288, 2006.
- [6] A. Shacham, K. Bergman, L. Carloni, "Photonic Networks-on-Chip for Future Generations of Chip Multiprocessors". IEEE Transactions on Computers, Vol. 57, No. 9, pp. 1246-1260, 2008.
- [7] M. Chang, J. Cong, A. Kaplan, M. Naik, G. Reinman, E. Socher, S.W. Tam, "CMP network-on-chip overlaid with multi-band RF-interconnect", in: Proceedings of IEEE International Symposium HighPerformance Computer Architecture (HPCA), pp. 191-202, 2008.
- [8] A. Ganguly, K. Chang, S. Deb, P.P. Pande, B. Belzer, C. Teuscher, "Scalable hybrid wireless network-on-chip architectures for multicore systems", IEEE Transactions on Computers, Vol. 60, No.10, pp. 1485–1502, 2011.
- [9] S. Deb, A. Ganguly, P. P. Pande, B. Belzer, D. Heo, "Wireless NoC as interconnection backbone for multicore chips: Promises and challenges", IEEE Journal on Emerging and Selected Topics in Circuits and Systems, Vol. 2, No.2, pp. 228–239, 2012.
- [10] S. Deb, K. Chang, X. Yu, S. P. Sah, M. Cosic, A. Ganguly, "Design of an energy-efficient CMOS-compatible NoC architecture with illimeter-wave wireless interconnects", IEEE Transactions on Computers, Vol. 62, No. 12, pp. 2382–2396, 2013.
- [11] K. Chang, S. Deb, A. Ganguly, X. Yu, S. P.

- platforms”, In Proceedings of 19th Euromicro International Parallel, Distributed and Network Based Processing (PDP) Conference, pp. 409–416, 2011.
- [34] W.H. Hu, C. Wang, N. Bagherzadeh, “Design and analysis of a mesh-based wireless network-on-chip”, In Proceedings of 20th Euromicro International Parallel, Distributed and NetworkBased Processing (PDP) Conference, pp. 483–490, 2012.
- [35] S.H. Mortazavi, R. Akbar, F. Safaei, A. Rezaei, “CPCA: An efficient wireless routing algorithm in WiNoC for cross path congestion awareness”, Integration, the VLSI Journal, 2019.
- [36] P. Pande, A. Ganguly, K. Chang, C. Teuscher, “Hybrid wireless network on chip: A new paradigm in multi-core design”, In 2<sup>nd</sup> International Workshop on Network on Chip Architectures, pp. 71-76, 2009.
- [37] V. Soteriou, N. Easley, H. Wang, B. Li, S. Peh, L. “Polaris: A system-level roadmap for on-chip interconnection networks”, In International Conference on Computer Design, pp. 134–141, 2006.
- salesman problem for hybrid wireless network-on-chip”, Wireless Networks, Vol. 1, pp. 1–14, 2017.
- [22] C. Wang, W. H. Hu, N. Bagherzadeh, “A load-balanced congestion-aware wireless network-on-chip design for multi-core platforms”, Microprocessors and Microsystems, Vol. 36, No. 7, pp. 555–570, 2012.
- [23] H. W. Hu, C. Wang, N. Bagherzadeh, “Design and analysis of a mesh-based wireless network-on-chip”, The Journal of Supercomputing, Vol. 71, No. 8, pp. 2830–2846, 2015.
- [24] A. Rezaei, F. Safaei, M. Daneshtalab, H. Tenhunen, “HiWA: A hierarchical wireless network-on-chip”, In: Conference on high performance computing & simulation (HPCS), pp. 499–505, 2014.
- [25] A. Rezaei, M. Daneshtalab, F. Safaei, D. Zhao, “Hierarchical approach for hybrid wireless network-on-chip in many-core era”, Computers & Electrical Engineering, Vol. 51, pp. 225–234, 2016.
- [26] A. Rezaei, M. Daneshtalab, D. Zhao, “CAP-W: Congestion-aware platform for wireless-based network-on-chip in many-core era”, Microprocessors and Microsystems, Vol. 52, pp. 23–33, 2017.
- [27] D. Zhao, Y. Wang, “SD-MAC: Design and synthesis of a hardware-efficient collision-free QoS-aware MAC protocol for wireless network-on-chip”, IEEE Transactions on Computers, Vol. 57, No. 9, pp. 1230–1245, 2008.
- [28] D. Zhao, Y. Wang, J. Li, T. Kikkawa, “Design of multi-channel wireless noc to improve on-chip communication capacity”, in: Fifth ACM/IEEE International Symposium on Network-on-Chip, pp. 177-184, 2011.
- [29] B. Bahrami, M.A.J. Jamali, Sh. Saeidi, “A novel hierarchical architecture for Wireless Network-on-Chip”, J. Parallel Distrib Comput, 2018.
- [30] A. Mineo, M. Palesi, G. Ascia, V. Catania, “Exploiting antenna directivity in wireless NoC architectures”, Microprocess. Microsyst. Vol. 43, pp. 59–66, 2016.
- [31] B. Korte, J. Vygen, “Combinatorial optimization: Theory and algorithms”, Berlin: Springer, 2008.
- [32] W. Dally, B. Towles, “Principles and practices of interconnection networks”, 1st ed., San Francisco: Morgan Kaufmann, 2003.
- [33] C.Wang, W.H. Hu, N. Bagherzadeh, “A wireless network-on-chip design for multicore

---

<sup>1</sup> Ultra Wide Band (UWB)

<sup>2</sup> Burstiness

<sup>3</sup> Injection

<sup>4</sup> Hop distance

<sup>5</sup> Hotspot

<sup>6</sup> evened-out

<sup>7</sup> Long distance

<sup>8</sup> Local

<sup>9</sup> Link utilization

<sup>10</sup> Packet-loss probability