طراحی یک سازوکار ارتباطی آگاه از ازدحام برای شبکه بی‌سیم روی تراشه در سیستم‌های چندهسته‌ای

عباس دهقانی* و کیوان رحیمی‌زاده

گروه مهندسی کامپیوتر، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه یاسوج، یاسوج، ایران

چکیده

معماری ترکیبی بی‌سیم شبکه روی تراشه به‌عنوان یک زیرساخت ارتباطی جدید جهت غلبه بر مشکلات معماری شبکه روی تراشه سنتی در سامانه‌های چندهسته‌ای پیشنهاد شده است. این معماری می‌تواند ارتباطاتی با پهنای باند بالا و توان مصرفی پایین برای سامانه‌های چند پردازنده‌ای روی تراشه را فراهم کند. از آنجا که هر مسیریاب بی‌سیم بین مجموعه‌ای از هسته‌های پردازشی مشترک است، احتمال ازدحام مسیریاب‌ها بالا می‌رود و درنتیجه منجر به افزایش تأخیر ارسال و مصرف توان می‌شود. در این مقاله یک معماری ترکیبی بی‌سیم روی تراشه شامل توپولوژی و ساز و کار آگاه از ازدحام ارتباطی با توجه به بهینه‌سازی کارایی و هزینه سامانه ارائه می‌شود. با استفاده از شبیه‌سازی، کارایی معماری پیشنهادی در مقایسه با معماری‌های مهم بی‌سیم روی تراشه مورد ارزیابی قرار می‌گیرد. نتایج شبیه‌سازی، مؤثربودن معماری پیشنهادی را از منظر بهره‌وری شبکه، تأخیر ارسالی و مصرف توان تحت الگوهای ترافیکی گوناگون نشان می‌دهد.

واژگان کلیدی: شبکه روی تراشه، اتصالات بی‌سیم، چندپردازنده‌ای روی تراشه، چندهسته‌ای، ازدحام.

Design of a novel congestion-aware communication mechanism for wireless NoC in multicore systems

Abbas Dehghani* & Keyvan RahimiZadeh

Department of Computer Engineering, Faculty of Engineering,
Yasouj University, Yasouj, Iran.

Abstract

Network-on-Chip (NoC) has emerged as leading interconnection backbone to integrate numerous blocks in a single chip. Although it offers a high-performance communication infrastructure by using integrated switch-based networks, the possible performance improvement of a conventional NoC is restricted by multi-hop communications due to high transmission latency and power consumption incurred by the data transmission between two distant cores. In order to mitigate this problem, wireless NoC (WNoC) architecture has proposed as an alternative solution to design flexible, low-power, and high bandwidth communication infrastructures for the future multicore platforms. It is necessary to mention that wire-based interconnections are still highly effective for short distances communications. Therefore, hybrid WNoC architectures are emerged as scalable communication structure to alleviate the deficits of traditional NOC architecture for the modern multicore systems. The hybrid WNoC architecture provides energy efficient, high data rate and flexible communications for NoC architectures. In these architectures, each wireless router is shared by a set of processing cores. However, sharing links between cores increases congestion in the network that limits the performance and scalability of NoCs and affects the system to work at less than its peak gain. Moreover, the congestion can heightens network inefficiency when the network is scaled to more nodes. In this paper, we propose a novel congestion-aware mesh-based WNoC architecture to address these issues. We

* نویسندهٔ عهده‌دار مکاتبات

* Corresponding author

• تاریخ ارسال مقاله: ۱۳۹۸/۷/۶ • تاریخ پذیرش: ۱۳۹۸/۵/۲۸ • تاریخ انتشار: ۱۴۰۱/۰۳/۳۱ • نوع مطالعه: پژوهشی

[Downloaded from jsdp.rcisp.ac.ir on 2026-09-15]

[DOI: 10.52547/jsdp.19.1.43]

consider optimization of the system cost and performance, simultaneously. For congestion control, it is recommended to include a multi-path routing. This means that several routes are calculated and recorded for each destination and finally the traffic load is distributed. Paths are selected based on their scores, which are obtained dynamically. When a path is used to transmit packets, the score of that path is reduced so that fewer packets are sent from that path and more scored paths are used. This approach aims to the distribution of traffic loads on the paths. The performance of the proposed architecture has been evaluated and compared with notable WNoC architectures through comprehensive simulations. The experimental results demonstrated the effectiveness of the proposed design under both synthetic and realistic traffic patterns in terms of network throughput, latency, and energy consumption.

Keywords: Network on Chip, Wireless communications, Multicore, System-on-Chip, Congestion.

۱- مقدمه

پیشرفت‌های پیوسته فنّاوری نیمه‌هادی‌ها، امکان تجمیع تعداد زیادی هسته‌های پردازشی را بر روی یک تراشه فراهم کرده است. براساس پیش‌بینی نقشه راه برای نیمه‌هادی‌ها ITRS[1] در سال ۲۰۲۰، تعداد هسته‌های پردازشی در پردازنده‌های آینده می‌تواند به هزاران عدد برسد [1]. حرکت سازندگان ریزپردازنده‌ها به سوی طراحی و پیاده‌سازی سیستم چندپردازنده‌ای روی تراشه است. افق آینده در مراکز صنعتی و پژوهشی-طراحی و ساخت پردازنده‌هایی با هزاران هسته روی یک تراشه است [2]. در همین راستا، اینتل در سال ۲۰۱۰ پروژه دیگری به نام رایانه ابری روی یک تراشه تعریف کرده است.

با توجه به افزایش حجم ترافیک و همچنین پیچیدگی‌های الگوهای ترافیکی در یک سیستم چندپردازنده‌ای روی تراشه، ارتباطات بین هسته‌ها نقش کلیدی در عملکرد سیستم روی تراشه دارد. با توجه به مقیاس‌پذیری و کارایی بالای شبکه‌های میان ارتباطی، ایده معماری شبکه روی تراشه NoC[2] به‌عنوان جایگزین روش‌های سنتی ارتباطات روی تراشه ارائه شده است [3]. در شبکه روی تراشه، هسته‌ها از طریق یک شبکهٔ میان ارتباطی مبتنی بر مسیریاب‌ها با یکدیگر در ارتباط هستند. اما به هرحال افزایش تعداد هسته‌ها منجر به افزایش چگالی تجمعی در سیستم‌های چندهسته‌ای و به تبع آن منجر به افزایش دمای سیستم روی تراشه می‌شود [34]. به‌طورکلی با وجود مزایای NoC، پژوهش‌های اخیر نشان داده NoC سنتی مبتنی بر اتصالات سیمی در تأمین‌کردن پهنای باند موردنیاز معماری با هسته‌های زیاد در محدوده توان قابل‌تحمل تراشه با چالش‌های جدی روبه‌رو است. عمده این محدودیت‌ها و مشکلات ناشی از ارتباطات چندگامه سیمی برای ارسال داده بین هسته‌ها با فاصله دور از هم است [4]. در همین راستا، پژوهش‌گران رویکردهای متفاوتی مانند مجتمع‌سازی سه‌بعدی[3] [5]، اتصالات نوری[4] [3]، اتصالات فرکانس رادیویی[5] [6] و اتصالات بی‌سیم[6] [5] را برای غلبه بر مشکلات اتصالات الکتریکی در شبکه‌های روی تراشه معرفی کرده‌اند. تمامی رویکردها قادر به افزایش عملکرد معماری سیستم‌های چندهسته‌ای هستند که هرکدام مطالعه جداگانه می‌طلبد. اتصالات بی‌سیم روی تراشه یک راه‌حل جدید و امیدبخش برای غلبه بر محدودیت‌های اتصالات سیمی است که می‌تواند پهنای باند لازم را برای جریان‌های مختلف داده فراهم کند [7]. اتصالات بی‌سیم روی تراشه ارتباطاتی با نرخ داده بالا و توان مصرفی پایین برای هسته‌ها با فاصله‌های دور از هم فراهم می‌کنند، اما از آنجا که اتصالات سیمی برای ارتباطات با فاصله کوتاه همچنان مناسب‌تر از اتصالات بی‌سیم است، معماری ترکیبی سیمی و بی‌سیم شبکه روی تراشه (WNoC[7]) به‌عنوان معماری غالب در این حوزه معرفی شده است [8]. در همین راستا معماری‌های ترکیبی بی‌سیم شبکه روی تراشه متعددی ارائه شده است [2, 9]. با این وجود، معماری ترکیبی WNoC با حجم بار کاری و پویایی زیادی مواجه است که به‌صورت یک مجموعه از وظایف ارتباطی روی هسته‌ها نگاشت می‌شوند. از آنجا که هر مسیریاب بی‌سیم بین مجموعه‌ای از پردازنده‌ها مشترک است، احتمال ازدحام مسیریاب‌های بی‌سیم بالا می‌رود. این پدیده نه‌تنها تأخیر ارسال را افزایش می‌دهد بلکه مصرف توان را نیز بالا می‌برد؛ بنابراین، کارایی معماری WNoC به‌طور مستقیم به شرایط ازدحام شبکه وابسته است. از سوی دیگر، با توجه به محدودیت‌های اتصالات بی‌سیم روی تراشه از قبیل محدودیت تعداد کانال کم بی‌سیم و مساحت تحمیلی، باید تعداد مناسبی از اتصالات‌های بی‌سیم در سطح تراشه درج شود [10]. در [11, 12] معماری‌های آگاه از ازدحام[8] معرفی شده است که منجر به توزیع بار روی پیوندهای ارتباطاتی بی‌سیم می‌شود؛ اما نقطه ضعف اصلی

[1] International Technology Roadmap for Semiconductors
[2] Network-on-Chip
[3] Three-dimensional (3-D) integration
[4] Optical interconnection
[5] Radio frequency interconnection(RF-I)
[6] Wireless interconnection
[7] Wireless Network on Chip
[8] Congestion aware

[Downloaded from jsdp.rcisp.ac.ir on 2026-09-15]

[DOI: 10.52547/jsdp.19.1.43]

آنها عدم بهره‌گیری از اتصالات سیمی بلند[1] است. گفتنی است که مؤلفان در [8] اثبات کرده‌اند که با توجه به سربار مساحتی تحمیلی و هزینه دسترسی به رسانه بی‌سیم، استفاده از اتصالات سیمی در فاصله‌های کمتر از هفت میلی متر مناسب‌تر از اتصالات بی‌سیم است. در این راستا، یک سازوکار ارتباطی آگاه از ازدحام برای معماری ترکیبی WNoC مبتنی بر ساختار مش پیشنهاد می‌شود که در آن تعداد مناسبی اتصالات بلند سیمی و بی‌سیم باتوجه به کارایی شبکه و سربار مساحتی درج می‌شوند. در این مقاله بخش‌های مختلف یک معماری WNoC شامل مانند توپولوژی، زیرساخت فیزیکی، سازوکار ارتباطی سیمی/بی‌سیم مشخص می‌شود. با استفاده از شبیه‌سازی، مؤثر بودن معماری پیشنهادی از منظر بهره‌وری شبکه، تأخیر ارسالی و مصرف توان ارزیابی می‌شود. همچنین، سربار مساحتی معماری پیشنهادی بررسی شده است. با انجام شبیه‌سازی با دقت سایکل[2]، معماری پیشنهادی را با معماری مش[3] NoC سنتی و معماری‌های ترکیبی بی‌سیم مهم دیگر از منظر توان مصرفی، بهره‌وری شبکه و تأخیر ارسال در حضور الگوهای ترافیک‌های مختلف ترکیبی و مبتنی بر کاربرد موردمطالعه قرارگرفته است. همچنین، فواید و هزینه مساحتی معماری پیشنهادی نسبت به معماری دیگر WNoC بررسی شده است. نتایج بیان‌گر آن است که رویکرد پیشنهادی با سربار مساحتی متوسطی می‌تواند کارایی مناسبی در طراحی و توسعه چندپردازنده-ای روی تراشه داشته باشد.

۲- پژوهش‌های پیشین

یکی از فناوری های نوظهور و امیدبخش، جهت غلبه بر محدودیت‌های اتصالات سیمی سنتی شبکه روی تراشه، شبکه بی‌سیم روی تراشه است که در ادامه این بخش مورد بررسی قرار می‌گیرد.

در [6]، ایده استفاده از امواج الکترو مغناطیس برای ارتباطات درون تراشه، به‌جای سیگنال‌های ولتاژ که تأخیر و انرژی مقیاس‌ناپذیری را تحمیل می‌کنند، بررسی شده است. این روش به اتصالات RF-I نامیده شد که می‌تواند تأخیر کم و مصرف انرژی کمتری را برای ارتباطات درون تراشه فراهم کند. فنّاوری RF-I زمان پاسخ و مصرف توان را کاهش می‌دهد، اما نه‌تنها هیچ اتصالی را حذف نمی‌کند، بلکه نیاز به اتصالات طولانی خطوط انتقال[4] دارند و هرگاه تعداد هسته‌ها زیاد می‌شود، مشکلات جانمایی[5]، بسته‌بندی و افزایش پدیده هم‌شنوایی[6] را به همراه دارد. در همین راستا، ایده ارتباطات بی‌سیم به وسیله آنتن‌های روی تراشه ارائه شد.

در [13] ایده اولیه استفاده از آنتن روی تراشه جهت توزیع پالس ساعت در سطح تراشه ارائه شده و از آن برای حل مشکلات انحراف و لرزش پالس ساعت استفاده شده است. در ادامه مؤلفان در [14]، یک معماری خوشه‌بندی بی‌سیم روی تراشه پیشنهاد کرده‌اند که در آن تعدادی مسیریاب مجهز به آنتن و مدارات لازم برای ارتباطات بی‌سیم مبتنی بر UWB[7] با فرکانس مرکزی ۳/۶ گیگاهرتز توزیع می‌شوند. مدارات فرستنده و گیرنده مبتنی بر UWB به‌کمک آنتن دوقطبی از نوع meander برد ارتباطی یک میلی‌متر و با نرخ ارسالی ۱/۶ گیگابیت بر ثانیه مهیا می‌کند. این معماری با مشکلات ناشی از ارتباطات چندگامه بی‌سیم مواجه است. در همین راستا، مؤلفان در ادامه طرح قبلی خود در [15]، پیشنهاد دادند که هسته‌ها در یک ساختار مِش سنتی قرار گیرند و هر هسته نیز مجهز به تجهیزات ارتباطات بی‌سیم شود. همچنین، در جهت استفاده کاراتر از ظرفیت کانال بی‌سیم، ایده روش دسترسی چندکاناله ارائه شده است. اما هزینه واحد کنترل دسترسی به رسانه MAC[8] چندکاناله بالا است. در [16]، یک معماری ترکیبی دوسطحی (سیمی و بی‌سیم) ارائه شد که در آن هر چهار گره به یک مسیریاب عادی از طریق سیم متصل است و ۱۶ عدد از این مسیریاب‌ها سیمی در محدوده یک مسیریاب بی‌سیم قرار می‌گیرد. با افزایش هسته‌ها، چهار تا از این مسیریاب های بی‌سیم در محدوده مسیریاب بی‌سیم دیگری در سطح بالاتر تشکیل یک دسته دیگر می‌دهد و به همین ترتیب با افزایش هسته‌ها معماری شکل می‌گیرد. معماری پیشنهادی با ساختار بازگشتی، گسترش‌پذیری مناسبی را به همراه دارد. در [17]، مؤلفان یک معماری خوشه‌بندی ترکیبی سیمی و بی‌سیم به نام IWISE[9] ارائه کرده‌اند که در آن هسته‌ها در یک شکل مِش مانند قرار می‌گیرند. این معماری باعث کاهش تعداد گام و توزیع بار ترافیکی در ارتباطات می‌شود. این معماری نسبت به معماری [16] مصرف توان کمتری دارد اما از لحاظ گسترش‌پذیری روش قبلی بهتر است. در [18]، مؤلفان نیز یک معماری بی‌سیم

[1] Long-distance
[2] Cycle accurate
[3] Mesh
[4] Transmission line
[5] Layout
[6] Crosstalk
[7] Ultra Wide Band
[8] Medium Access Control
[9] Inter-router wireless scalable express channel

[Downloaded from jsdp.rcisp.ac.ir on 2026-09-15]
[DOI: 10.52547/jsdp.19.1.43]

روی تراشه مبتنی بر مش ارائه داده‌اند که در آن تعدادی گره مجهز به بی‌سیم می‌شوند و مسئول ارتباطات راه دور هستند. مشکل اصلی معماری‌ها مطرح‌شده، عدم بهره‌گیری از اتصالات بلند سیمی است. در همین راستا در [10]، یک معماری ترکیبی دوسطحی به‌کمک آنتن‌های مبتنی بر کربن نانو تیوب CNT[1] ارائه شد که در آن هسته‌های درون تراشه با توجه به همسایگی‌شان به زیر شبکه‌های تقسیم می‌شوند. هر زیرشبکه به یک مسیریاب مجهز به ارتباطات بی‌سیم وصل می‌شود و در سطح بالاتر این مسیریاب‌ها به‌وسیله ارتباطات سیمی و بی‌سیم مبتنی بر گراف‌های با خاصیت دنیای کوچک[2] به هم وصل می‌شوند. نتایج شبیه‌سازی، بیان‌گر کارایی بالای رویکرد پیشنهادی در زمینه مصرف انرژی و تأخیر ارتباطات است.

در [19]، مؤلفان به جای آنتن‌های مبتنی بر CNT آنتن‌های روی تراشه در محدوده امواج میلی‌متر[3] پیشنهاد داده‌اند که محدوده بیست میلی‌متری را با نرخ ارسالی شانزده گیگا بیت بر ثانیه با مصرف انرژی ۲/۳ پیکوژول بر بیت فراهم می‌کند. زیرساخت پیشنهادی امکان بهره‌برداری از سه کانال مجزا با پهنای باند شانزده گیگاهرتز فراهم می‌کند. با درنظرگرفتن بهینه‌سازی هم زمان کارایی و هزینه تعداد مسیریاب بی‌سیم مناسب برای معماری با ۲۵۶ هسته به‌دست آمده است. در [9, 20, 21] نیز معماری‌های ترکیبی سیمی و بی‌سیم ارائه شده که کارایی سیستم را روی تراشه بهبود می‌دهند. آنچه روشن است، این‌که در این پژوهش‌های یادشده مسأله ازدحام مسیریاب‌های بی‌سیم در نظر گرفته نشده است. در [11] یک معماری آگاه از ازدحام پیشنهاد شده است که منجر به توزیع بار روی پیوندهای ارتباطی بی‌سیم می‌شود. همچنین در [12]، یک معماری ترکیبی مبتنی بر مِش استاندارد با هدف کنترل ازدحام ارائه شده است. در این مقاله پیشنهاد شده که تراشه به چهار قسمت به نام زیر شبکه تقسیم شود و هر زیر شبکه به یک مسیریاب بی‌سیم مجهز است. همچنین، ارسال بسته‌ها درون یک زیر شبکه از طریق ارتباطات سیمی انجام می‌شود و اگر مقصد در زیر شبکه دیگر باشد از ارتباطات بی‌سیم که از آن به‌عنوان میان‌بر نام برده‌اند، استفاده می‌شود. نقطه ضعف اصلی این پژوهش‌ها عدم بهره‌گیری از اتصالات سیمی بلند در طراحی معماری پیشنهادی است. در [22] یک معماری کم توان با استفاده از مسیریاب‌های بی‌سیم آگاه از ازدحام ارائه شده است. در این معماری، مسیریاب‌ها به کمک واحدهای شمارنده و تحلیل آدرس اطلاعات ازدحام شبکه را به‌صورت پویا پایش می‌کنند. سپس، یک الگوریتم قضاوت ازدحام امکان دسترسی مسیریاب‌ها را به کانال بی‌سیم اولویت‌دهی می‌کند. طرح پیشنهادی باعث کاهش ازدحام در مسیریاب‌های بی‌سیم می‌شود. هرچند در این معماری، ازدحام مسیریاب‌ها سیمی عادی لحاظ نشده است.

نویسندگان در [23, 24] ثابت کرده‌اند که الگوریتم مسیریابی آگاه از ازدحام با استفاده از فناوری پویای مقیاس‌گذاری فرکانس-ولتاژ (DVFS[4]) در سطح شبکه می‌تواند مشخصات گرمایی و توان مصرفی شبکه را با توزیع بار ترافیکی بهبود دهد. به هر حال، طرح پیشنهادی برای یک ساختار نامنظم به‌منظور بهنیه‌سازی برای یک کاربرد مشخص است و برای کاربردهای عمومی مناسب نیست.

۳- رویکرد پیشنهادی

در این بخش، قسمتهای مختلف یک معماری ترکیبی WNoC مبتنی بر ساختار مش آگاه از ازدحام شامل توپولوژی، زیرساخت فیزیکی و ساز و کار آگاه از ازدحام ارتباطی سیمی/ بی‌سیم به نام معماری CMWNoC[5] برای سیستم‌های چندپردازنده‌ای روی تراشه پیشنهاد می‌شود.

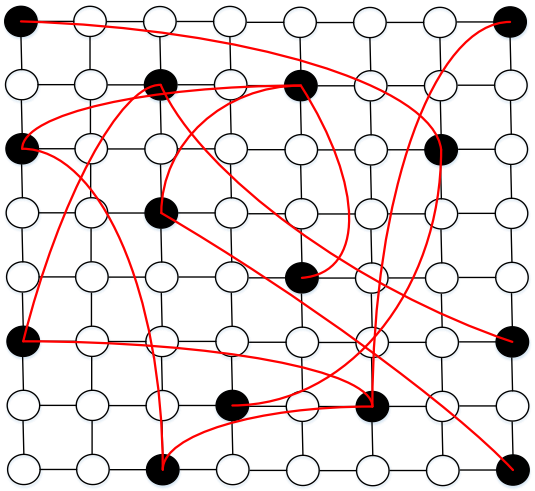
۳-۱- توپولوژی

معماری پیشنهادی ترکیبی WNoC، بر اساس چیدمان مِش دوبعدی استاندارد شکل می‌گیرد. از آنجا که ساختار منظم مِش یک شبکه با اتصالات سیمی کوتاه و مسیریاب‌های با پیچیدگی طراحی کم را فراهم می‌کند، این امر به پیاده‌سازی ساده شبکه کمک می‌کند. همچنین، این ساختار با وجود داشتن مسیرهای مجزای متعدد بین گره‌ها، امکان توزیع بار و کاهش ازدحام یا بهره‌گیری از الگوریتم‌های مسیریابی مناسب را فراهم می‌کند؛ اما به‌هرحال با افزایش تعداد هسته‌ها، قطر شبکه افزایش می‌یابد و مشکلات ارسال بین گره‌های دور تشدید می‌شود؛ ازاین‌رو می‌توان با درج مناسب اتصالات بلند مشکلات افزایش قطر شبکه را کاهش داد و همچنین ضمن استفاده از فواید قاعده‌مندی[6] زیرساخت مِش، آن را

[1] Carbon nanotube
[2] Small world
[3] Millimeter wave
[4] Dynamic Voltage Frequency Scaling
[5] Congestion-aware Mesh-based WNoC
[6] Regularity

[Downloaded from jsdp.rcisp.ac.ir on 2026-09-15]
[DOI: 10.52547/jsdp.19.1.43]

به‌صورت سفارشی نیز طراحی کرد [25]. سیستم مورد مطالعه یک شبکه مش m×m است که در قالب یک گراف $G_m= (V_m, E_m)$ معرفی می‌شود و در آن V_m بیان‌گر مجموعه رئوس و E_m مجموعه یال‌های آن است. هر هسته پردازشی و مسیریاب مربوطه معادل یک گره و هر اتصال سیمی پایه بین آنها، معادل یک یال در نظر گرفته می‌شود. در طرح معماری پیشنهادی تعدادی از مسیریاب‌های گراف مِش با مجهز شدن به اتصالات بلند، ارسال فاصله دور بین هسته‌ها را انجام می‌دهند. مسیریاب‌های مجهزشده به اتصالات بلند به‌عنوان دروازه شناخته می‌شوند.



(شکل-۱): نمای کلی از رویکرد پیشنهادی برای معماری WNoC

(Figure-1): General viewpoint of the proposed approach for WNoC architecture

مبنای تصمیم‌گیری در مورد ارتباطات بین دو گره، فاصله بین دو گره است. هسته‌ها برای ارتباطات نزدیک از اتصالات سیمی پایه در ساختار مِش و برای ارسال فاصله دور، از اتصالات بلند استفاده می‌کنند. شکل (۱) نمایی از معماری پیشنهادی را نشان می‌دهد. شبکه ارتباطی بین سرگروه‌ها با گراف $G_L=(V_L,E_L)$ نمایش داده شده است که در آن مجموعه V_L زیرمجموعه V_m است و شامل گره‌هایی است که نقش دروازه[1] را در معماری پیشنهادی دارند و E_L شامل مجموعه اتصالات بلند ایجادشده بین گره‌های دروازه است. همه اعضای مجموعه V_m می‌توانند یک مکان احتمالی برای دروازه‌ها باشند. یکی از ویژگی‌های مطلوب شبکه ارتباطی بین دروازه‌ها امکان اتصال مسیریاب‌ها بر اساس شبکه با مدل دنیای کوچک (small world) به یکدیگر است. در این مدل، فاصله بین دو رأس گراف متناسب با لگاریتم تعداد رئوس شبکه رشد می‌کند. این نوع مدل گراف، منجر به ایجاد تعداد خوشه‌های زیاد با میانگین فاصله کم بین گره‌ها می‌شود. خوشه‌بندی مشخص می‌کند که تا چه اندازه همسایه‌های یک رأس با یکدیگر در ارتباط هستند. ما از مدل Watts-Strogatz برای گراف با خاصیت دنیای کوچک استفاده کرده‌ایم [26]. این مدل با حلقه‌ای از N رأس که به نزدیک‌ترین همسایگانشان متصل هستند، شروع می‌کند به‌نحوی‌که هر رأس به تعداد i رأس همسایه‌اش متصل است؛ سپس به‌صورت تصادفی هر یال شبکه را با احتمال p حذف و یال جدیدی جایگزین آن می‌شود به‌نحوی‌که همگنی تابع توزیع از بین نرود. این جایگزینی بدین صورت انجام می‌شود که یک سر یال را به رأس جدیدی که به‌طور تصادفی از کل شبکه انتخاب می‌شود، متصل شود. البته، با این محدودیت که بین هیچ دو رأسی نمی‌توان بیش از یک یال داشت. احتمال P_{ij} برای استقرار پیوندها مطابق تابع توزیع قانون توانی[2] که در رابطه زیر آمده، در نظر گرفته شده است:

$$P_{ij} = \frac{Fij^{-a} \times Dij^{-b}}{\sum_{\forall i} \sum_{\forall j} Fij^{-a} \times Dij^{-b}} \qquad (۱)$$

در این رابطه P_{ij} برابر احتمال درج پیوند بلند بین دو مسیریاب i و j است. D_{ij} برابر فاصله بین دو مسیریاب و F_{ij} فرکانس ترافیک بین هر دو پردازنده است. پارامترهای a و b به‌ترتیب ماهیت اتصال و اهمیت ترافیک را می‌رساند. مقدار بزرگ a بیانگر اتصالات محلی زیاد و تعداد کم پیوند بلند است و مقدار بزرگ b بیان‌گر احتمال بیشتر استقرار پیوندهای بلند بین هسته‌ها با تبادل ترافیک بالا است. از سوی دگر، باید توجه داشت که درعمل فضای جستجو برای یافتن مکان دروازه‌ها آنقدر وسیع است که درعمل با جستجوی کامل نمی‌توان مسأله را حل کرد؛ ازاین‌رو مسأله درج اتصالات بلند را می‌توان به‌کمک روش‌های بهینه‌سازی حل کرد. برای نمونه، می‌توان از الگوریتم‌های تکاملی[3] مبتنی بر ژنتیک بهره برد. در این مقاله، ما از فریم ورک ParadisEO [27] برای پیاده‌سازی الگوریتم درج اتصالات بلند می‌کنیم. ParadisEO یک فریم ورک شی‌گرا مبتنی بر زبان C++ برای پیاده‌سازی الگوریتم‌های فرا اکتشافی[4] است. در

[1] Gateway

[2] Power-law distribution
[3] Evolutionary Algorithms
[4] Metaheuristics

[Downloaded from jsdp.rcisp.ac.ir on 2026-09-15]

[DOI: 10.52547/jsdp.19.1.43]

الگوریتم پیشنهادی مؤلفه‌های نامزد[1] شامل گره‌ها، اتصالات و نوع اتصال هستند که آرایش شبکه بین داروزه‌ها را مشخص می‌کنند. یک آرایه از اشاره‌گرها که به هر گره شبکه که با مختصات فیزیکی (x,y) در شبکه مش مشخص می‌شوند، وجود دارد. اتصالات نیز به‌صورت مجموعه‌ای از جفت‌گره‌ها توصیف می‌شوند که ویژگی‌های مانند هزینه مساحتی، بیشینه طول اتصال و مصرف انرژی برای آنها ذخیره می‌شود. در الگوریتم پیشنهادی، تمام عمل‌گرهای ژنتیک به‌طورمستقیم در سطح شبکه کار می‌کنند. برای عمل‌گر تقاطع[2]، از عمل تقاطع دو نقطه‌ای استاندارد استفاده می‌شود. این عمل برای هر نوع از اتصال (سیمی/بی‌سیم) اعمال می‌شود. برای عمل‌گر جهش[3] نیز به‌طور تصادفی یک نوع اتصال انتخاب و تعدای از اتصالات با کمک اضافه و حذف‌کردن اتصال از آرایه مربوط به اتصالات تغییر داده می‌شود. در تولید نسل بعدی، نامزد جدید براساس الگوریتم تورنمنت قطعی[4] انتخاب می‌شود. برای ارزیابی جواب هر مرحله از یک تابع هدف به نام F استفاده می‌شود که به‌صورت رابطه (۲) است:

$$F = \alpha * \mu + (1-\alpha) * \text{Wiring cost.} \qquad (۲)$$

در این تابع μ بیان‌گرکارایی معماری و Wiring Cost بیان‌گر هزینه تحمیلی معماری پیشنهادی است. پارامتر α نیز اهمیت کارایی و هزینه را تعیین می‌کند. μ میانگین طول مسیر بین دروازه‌ها است که به‌صورت رابطه (۳) محاسبه می‌شود:

$$\mu = \sum_{\forall i}\sum_{\forall j}\frac{h_{ij}}{N^2 - N} \qquad (۳)$$

در این رابطه N تعداد دروازه‌ها و h_{ij} کوتاه‌ترین فاصله بین دو گره بر حسب تعداد گام است که براساس الگوریتم کوتاه‌ترین مسیر دایجسترا[5] به‌دست می‌آید. پارامتر Wiring Cost بیان‌گر هزینه مساحت تحمیلی اتصال بلند سیمی و مساحت تحمیلی آنتن‌ها و فرستنده/گیرنده بی‌سیم است. با اعمال الگوریتم پیشنهادی، توپولوژی معماری CMWNoC به‌دست می‌آید.

۲-۳- مسیریابی

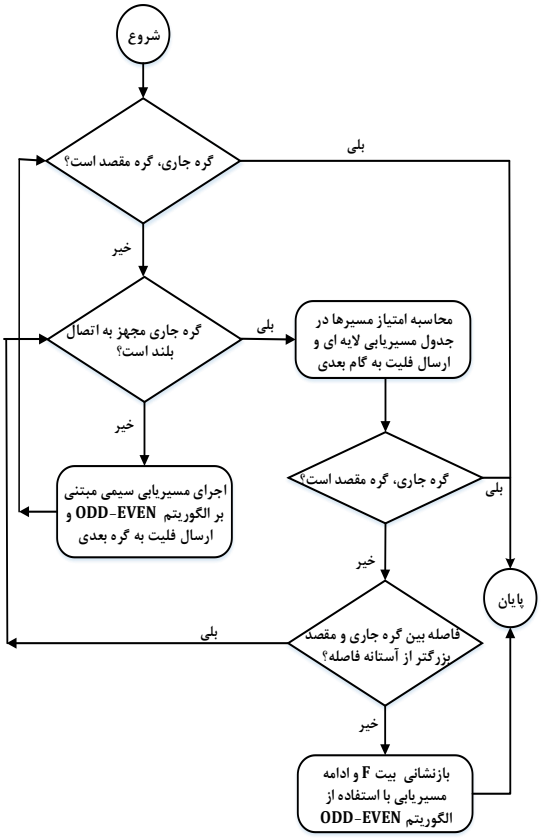
در زیرساخت پیشنهادی برای هر گره یک نشانی منحصربه‌فرد در نظر گرفته شده است. با فرض اینکه گره گوشه پایین سمت چپ ساختار مش در معماری دارای مختصات (۰،۰) باشد، هر گره دارای یک نشانی به مختصات (x,y) است. مبنای تصمیم‌گیری در مورد ارتباطات بین دو گره، فاصله منهتن بین آنها است که ارتباطات را به دو رده ارتباطات نزدیک و دور تقسیم می‌کند. برای این هدف، پارامتر آستانه فاصله[6] تعریف می‌شود که بیان‌گر بیشینه فاصله منهتن بین دو گره است که ارتباطات سیمی مش پایه، احتیاجات کارایی سیستم را برآورده می‌کند. به عبارتی، بیشینه فاصله مجاز برای داشتن ارتباطات سیمی بین دو گره است که بر حسب تعداد گام اتصالات سیمی پایه در ساختار مِش بیان می‌شود. هنگام شروع ارتباط، اگر فاصله بین دو گره بزرگتر از پارامتر آستانه فاصله باشد به‌عنوان ارتباط دور تفسیر می‌شود که نیاز به استفاده از گره دروازه است و در غیر این‌صورت، به‌عنوان ارتباط–نزدیک تلقی می‌شود. ارتباطات در معماری CMWNoC بر مبنای روش راه گزینی خزشی[7] انجام می‌گیرد. در این روش بسته‌ها به اجزای کوچک‌تری به نام فلیت[8] شامل فلیت‌های سرآیند، بدنه و پایانی تقسیم می‌شوند. فلیت‌ها به‌صورت خط لوله‌ای فلیت سرآیند را دنبال می‌کنند [3]. بر همین اساس مسیریاب‌های معماری پیشنهادی به‌صورت خط لوله‌ای شامل مراحل ذخیره فلیت در بافر ورودی، محاسبه مسیر، تخصیص کانال مجازی، پیمایش سوئیچ و پیمایش پیوند در نظر گرفته می‌شوند. در این مقاله برای مدیریت ارتباطات فاصله دور و نزدیک، علاوه‌بر فیلدهای مرسوم از قبیل نشانی مبدأ، نشانی مقصد و فیلدهای کنترل جریان در فلیت سرآیند، فیلد کنترلی جدیدی به نام F اضافه می‌شود که بیان‌گر نیاز به دروازه برای برقراری ارتباطات بلند است (شکل ۲). مقدار پیش فرض فیلد F صفر است. در ابتدای ارتباط، فاصله منهتن بین مبدأ و مقصد به‌دست می‌آید. اگر فاصله کوچک‌تر از حد آستانه بود، بسته‌ها بر مبنای مسیریابی ارتباطات نزدیک ارسال می‌شوند که در ادامه شرح داده می‌شود.

برای ارتباطات فاصله نزدیک، یک مسیریابی تطبیقی توزیع‌شده آگاه از ازدحام مبتنی بر مدل چرخش زوج-فرد (ODD-EVEN) [28] استفاده شده است. الگوریتم مسیریابی در شرایط ازدحام بسته‌ها براساس سیاست پیشنهادی ارسال می‌کند. این الگوریتم در حالت

[1] Individual
[2] Cross over
[3] Mutation
[4] Deterministic tournament
[5] Dijkstra's shortest path
[6] Threshold distance
[7] Wormhole switching
[8] Flit

[Downloaded from jsdp.rcisp.ac.ir on 2026-09-15]
[DOI: 10.52547/jsdp.19.1.43]

عادی بسته‌ها را طبق الگوریتم پایه از طریق کوتاه‌ترین مسیر ارسال و در شرایط ازدحام از مسیرهای دیگر استفاده می‌کند. (شکل ۳). همان‌طور که گفته شد، در ساختار پیشنهادی هر گره دارای مختصات است. در این مدل اگر مختصات x زوج باشد، آن ستون زوج و اگر مختصات x فرد باشد، ستون مربوطه فرد نامیده می‌شود. ایدهٔ اصلی الگوریتم مسیریابی بر این اساس است که موقعیت چرخش‌ها را محدود می‌کند تا از به‌وجودآمدن بن‌بست جلوگیری شود. با این ترفند نیازی به کانال مجازی[1] برای مدیریت بن‌بست نیست. روش کار به این نحو است که در گره‌هایی که در ستون زوج هستند، بسته‌ها نمی‌توانند چرخش‌های شرق به شمال (EN) و شرق به جنوب (ES) داشته باشند و همچنین در گره‌هایی که در ستون فردند، بسته‌ها نمی‌توانند چرخش‌های شمال به غرب (NW) و جنوب به غرب (SW) داشته باشند. با دریافت هر بسته در گره، واحد مسیریابی امتیازات هر جهت را تنها بر مبنای تعداد واحد بافر آزاد درگاه‌ها محاسبه کرده و با توجه به چرخش‌های غیر مجاز، گره با بالاترین امتیاز انتخاب می‌شود تا تطبیق‌پذیری صورت بگیرد (شکل ۳).



(شکل-۲): سازوکار تصمیم گیری گره‌های میانی در الگوریتم مسیریابی پیشنهادی

(Figure-2): Decision making procedure for intermediate nodes in the proposed routing algorithm

[1] Virtual channel

اگر در ابتدای مسیریابی فاصله گره مبدأ و مقصد از حد آستانه بیشتر باشد، مبدأ با تنظیم بیت F در فلیت سرآیند، عملیات مسیریابی را شروع می‌کند. گره‌های میانی با مشاهده بیت F و در صورت مجهزبودن به اتصالات بلند، مسیریابی دور را انجام می‌دهند (شکل ۲). با توجه به نحوه درج پیوندهای بلند شبکه ارتباطی متشکل از سرگروه، یک شبکه غیرمنظم تشکیل می‌شود که دست‌یابی به مسیریابی عاری از بن‌بست با الگوریتم‌های معمول دشوار است. در همین راستا، پیشنهاد استفاده از الگوریتم‌های مسیریابی لایه‌ای[2] ارائه شده است. مسیریابی لایه‌ای یک روش مؤثر برای مسیریابی عاری از بن‌بست در شبکه‌های غیرمنظم است [26]. در این روش، کانال‌های مجازی مسیریاب‌ها به لایه‌های مختلفی تقسیم و به هر لایه مجموعه‌ای از زوج گره‌های مبدأ و مقصد انتساب داده می‌شود؛ به‌نحوی‌که چرخش وابستگی بین آن گره‌ها وجود نداشته باشد و از بروز بن‌بست جلوگیری شود. مسیرهای بین هر مبدأ و مقصد از قبل به‌صورت برون‌خط محاسبه می‌شود. همچنین، از تابع انتساب ترافیک پیشنهاد شده در [29] برای انتساب زوج‌های مبدأ و مقصد را به لایه‌های مختلف استفاده می‌شود. برای مدیریت ازدحام پیشنهاد می‌شود تا یک مسیریابی لایه‌ای چندمسیره لحاظ شود. بدین معنی که برای هر مقصد چندین مسیر محاسبه و ثبت و درنهایت بار ترافیکی توزیع شود. مبنای انتخاب مسیرها نیز امتیاز آن مسیر است که به‌صورت پویا به‌دست می‌آید.

با هر بار استفاده از یک مسیر، امتیاز آن مسیرکاسته می‌شود تا بسته‌های کمتری از آن مسیر ارسال و از مسیرهای با امتیاز بیشتر استفاده شود. این رویکرد منجر به توزیع بار ترافیکی مسیرها می‌شود. امتیاز هر مسیر از رابطه (۴) زیر به‌دست می‌آید:

$$Grade_i = U_i + F_i \qquad (۴)$$

در این رابطه F_i تعداد بافر آزاد در بافر ورودی گام بعدی و U_i میزان بهره برداری از اتصال بلند مربوطه است که با هر دسترسی به صورت نمایی کاهش می‌یابد.

از جدول‌های مسیریابی برای پیاده‌سازی مسیریابی لایه‌ای در معماری پیشنهادی استفاده شده است. از آنجا که بدون استفاده از جدول‌ها مسیریابی سربار محاسباتی اضافی به‌نسبه پیچیده‌ای برای محاسبه مسیرها تحمیل می‌شود، از این‌رو کانال‌های مجازی رزروشده مربوط به

[2] Layard routing

[Downloaded from jsdp.rcisp.ac.ir on 2026-09-15]
[DOI: 10.52547/jsdp.19.1.43]

کوتاه‌ترین مسیرها مطابق الگوریتم لایه‌ای در زمان طراحی محاسبه و در جدول‌های مسیریابی ذخیره می‌شود؛ درنهایت، این رویکرد موجب حذف سربار محاسبه مسیر می‌شود.

/*مجموعه پورت‌های در دسترس (براساس جهت جغرافیایی) :P */
$P = \{\}$
اگر گره جاری گره مقصد است، **آنگاه**
بسته به گره جاری تحویل داده شود.
پایان.
در غیر این‌صورت، اگر گره جاری با گره مقصد هم ستون باشد، **آنگاه**
اگر مقصد در سمت شمال گره جاری است، آنگاه
$P = P \cup North$
در غیر این‌صورت،
$P = P \cup South$
در غیر این‌صورت، اگر مقصد در سمت شرق گره جاری است، **آنگاه**
اگر گره جاری با گره مقصد هم سطر باشد، **آنگاه**
$P = P \cup East$
در غیر این‌صورت، اگر شماره ستون گره جاری فرد باشد، **آنگاه**
اگر گره مقصد در شمال گره جاری باشد، **آنگاه**
$P = P \cup North$
در غیر این‌صورت،
$P = P \cup South$
اگر شماره ستون گره مقصد فرد باشد یا بیش از یک ستون دورتر باشد، **آنگاه**
$P = P \cup East$
در غیر این‌صورت،
$P = P \cup West$
اگر شماره ستون گره جاری زوج باشد و با گره مقصد هم‌ردیف نباشد، **آنگاه**
اگر مقصد در سمت شمال گره جاری است، **آنگاه**
$P = P \cup North$
در غیر این‌صورت،
$P = P \cup South$
از مجموعه P جهت مناسبی را براساس ازدحام انتخاب کن.
پایان

(شکل-۳): مسیریابی تطبیقی مبتنی بر الگوریتم ODD-EVEN
(Figure-3): Adaptive routing algorithm based on the ODD-EVEN algorithm.

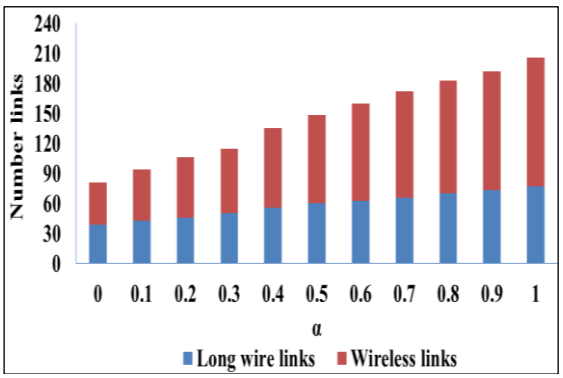
۴- ارزیابی کارایی

در این بخش به ارزیابی کارایی معماری پیشنهادی پرداخته می‌شود. در ابتدا توپولوژی CMWNoC بر اساس رویکرد پیشنهادی درج اتصالات بلند شکل می‌گیرد و در ادامه از طریق شبیه‌سازی با دقت سایکل رفتار معماری را تحت الگوهای ترافیکی مختلف با شبکه روی تراشه مش سنتی و معماری های قابل توجه بی‌سیم روی تراشه برحسب تأخیر ارسال، بهره‌وری شبکه مورد مقایسه قرار می‌گیرد؛ همچنین، جهت بررسی امکان‌پذیری معماری پیشنهادی، سربار مساحتی و توان مصرفی شبکه مورد ارزیابی قرار می‌گیرد. برای انجام آزمایش‌ها، سیستمی متشکل از ۲۵۶ هسته در یک ساختار مِش ۱۶×۱۶ روی یک دای[1] 20mm×20mm مبتنی بر مدل اتصالی مرجع [3] در نظر گرفته شده است.

۴-۱- استقرار اتصالات بلند

در این بخش، از طریق الگوریتم پیشنهادی درج اتصالات بلند معماری CMWNoC انجام می‌گیرد. از فریم ورک ParadisEO [27] برای پیاده‌سازی الگوریتم درج استفاده می‌شود که در آن پارامترها و فرضیات زیر در نظر گرفته شده است.

بیشینه تعداد درگاه برای سرگروه‌ها برابر ۹ در نظر گرفته شده است که این مقدار تضمین می‌کند تا اندازه مسیریاب‌ها منطقی و احتیاجات زمانی سیستم برآورده شود [26]. بیشینه طول برای اتصال سیمی برابر ۷/۵ میلی متر در نظر گرفته شده که این مقدار با توجه به چیدمان سرگروه‌ها و طول اتصال سیمی بلند مناسب [8] انتخاب شده است. مشخصات اتصالات بی‌سیم شامل لایه فیزیکی و ساز وکار دسترسی به رسانه بی‌سیم از [10] است. بیشینه تعداد کانال بی‌سیم مجزا برابر ۲۴ و بیشینه برد ارتباطی بی‌سیم برابر ۲۳ میلی‌متر در نظر گرفته شده است. همچنین، پارامترهای تنظیم الگوریتم تکاملی با آزمایش و مطالعات گذشته [27] به‌دست آمده است. اندازه جمعیت برابر صد، احتمال تقاطع برابر ۰/۸ و احتمال جهش برابر ۰/۴ در نظر گرفته شده است. نتایج بعد از تکرار پنج‌هزار نسل به‌دست می‌آید. با درنظرگرفتن پارامترها و فرضیات بالا توزیع اتصالات بلند سیمی و بی‌سیم به‌دست می‌آید تا معماری CMWNoC شکل بگیرد. شکل (۴) توزیع پیوندهای بلند را به‌صورت تابعی از وزن α نشان می‌دهد. شکل (۴) نشان می‌دهد که تعداد پیوندهای بلند سیمی و بی‌سیم با افزایش کارایی (وقتی α به سمت یک تمایل دارد) افزایش می‌یابد؛ زیرا پیوندهای بلند بیشتری جهت کوتاه‌تر کردن مسیرها نیاز است.



(شکل-۴): توزیع لینک‌های بلند سیمی و بی‌سیم برای مقادیر مختلف α
(Fig.ure-4): Wire/wireless long-distance links distribution for different α

[1] Die

[Downloaded from jsdp.rcisp.ac.ir on 2026-09-15]
[DOI: 10.52547/jsdp.19.1.43]

همچنین، در این شکل مشخص است که با افزایش کارایی، معماری CMWNoC نیاز به پیوندهای بی‌سیم بیشتری نسبت به پیوندهای بلند سیمی دارند که این ناشی از توانایی پیوندهای بی‌سیم تک گامه برای ارسال‌های فاصله دور است. البته در وزن‌های مختلف α تعداد قابل‌توجهی اتصال سیمی بلند وجود دارد به این معنی که پیوندهای سیمی بلند نیز نقش عمده‌ای در کارایی دارند؛ زیرا برای اتصال دروازه‌ها در فاصله‌های نزدیک پیوندهای سیمی مناسب‌ترند. هر وزن α، بیان‌گر یک معماری CMWNoC متفاوت است که هرکدام مصالحه متفاوتی بین کارایی و هزینه دارد. برای ارزیابی دقیق معماری پیشنهادی، سه وزن متفاوت از شکل (۴) انتخاب شده است. نخست معماری CMWNoC با وزن α=0 که توجه بیشتر آن به هزینه مساحتی است، دوم معماری CMWNoC با وزن α=1 که توجه بیشتر آن به کارایی است و سوم معماری CMWNoC با وزن α=0.5 که توجه متعادلی به هزینه و کارایی دارد.

۲-۴- نتایج شبیه‌سازی

برای ارزیابی کارایی معماری پیشنهادی CMWNoC از شبیه‌ساز JADE [30] استفاده می‌شود. این ابزارجهت شبیه‌سازی یک سیستم کامل شامل هسته های پردازشی، حافظه و شبکه میان ارتباطی هسته ها به‌کار می‌رود. در آزمایش‌های این بخش، هر بسته شامل هشت فلیت است و اندازه هر فلیت ۶۴ بیت است. کلیه اتصالات سیمی دو جهته با عرض ۶۴ بیت هستند. هر درگاه متصل به پیوند سیمی شامل دو کانال مجازی است که در هر کانال یک بافر FIFO به اندازه ۲ فلیت قرار دارد. با توجه به مسیریابی لایه‌ای برای ارتباطات دور، هر درگاه مرتبط به پیوندهای بلند دارای چهار کانال مجازی است که هر کانال یک بافر FIFO به اندازه دو فلیت دارد. با فرض فنّاوری ۴۵ نانومتر، مسیریاب‌ها با فرکانس دو گیگاهرتز کار می‌کنند. با توجه نحوه اتصال مِش برگرفته از مرجع [3]، فاصله بین هر دو مسیریاب همسایه ۱/۳۳ میلی‌متر است. پیوندهای سیمی با این طول را می‌توان بر مبنای مدل [31] به‌نحوی طراحی کرد که تأخیر انتشار آن کمتر از یک سیکل ساعت یعنی پانصد پیکوثانیه باشد. مشخصات اتصالات بی‌سیم و ساز وکارکنترل دسترسی به رسانه بی‌سیم از مرجع [10] گرفته شده است. واحد ارسال بی‌سیم نیز از سیاست چرخش نوبتی[1] جهت رسیدگی به تقاضای هم زمان برای بی‌سیم استفاده می‌کند. مشخصات سیستم پردازشی مورد مطالعه که برای معماری پیشنهادی درنظرگرفته‌شده برگرفته از مرجع [30] است.

[1] Round robin

در معماری HiWA یک ساختار اولیه مِش وجود دارد که به شانزده زیرشبکه مش ۴×۴ تقسیم و با توجه به بهینه‌سازی کارایی در هر زیرشبکه یک مسیریاب مجهز به بی‌سیم می‌شود. در معماری MWiNoC یک شبکه ۱۶×۱۶ مش هر گره با بیشینه فاصله سه گام با یک سرگروه ارتباط دارد و با توجه به پارامتر های کارایی و هزینه تحمیلی، پیوندهای بلند در شبکه درج می‌شود.

در این بخش برای ارزیابی معیارهای تأخیر ارسال و بهره‌وری شبکه در نظر گرفته شده است. تأخیر ارسال برابر با میانگین تعداد کلاک سایکلی است که برای ارسال یک بسته از گره مبدأ به گره مقصد مورد نیاز است. همچنین، بهره‌وری شبکه برابر بیشینه تعداد بسته‌های است که به‌طور موفقیت‌آمیز برای یک هسته پردازشی در یک کلاک سایکل به مقصد می‌رسند.

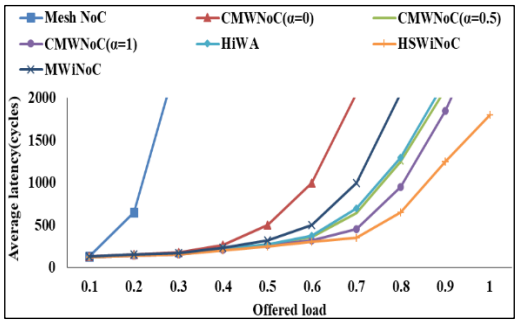
شکل‌های (۵-الف) و (۵-ب) به‌ترتیب، میانگین تأخیر ارسال بسته‌ها و بهره‌وری اشباع معماری‌های مورد مطالعه تحت ترافیک ترکیبی یک‌نواخت[2] را نشان می‌دهند. شکل‌های (۶-الف) و(۶-ب) به‌ترتیب، میانگین تأخیر ارسال بسته‌ها و بهره‌وری اشباع معماری های مورد مطالعه تحت ترافیک ترکیبی نقاط داغ[3] را نشان می‌دهند. الگوی ترافیک نقطه داغ براساس [25] در نظرگرفته شده است. ما در این کار، به‌دلخواه سه گره به‌عنوان نقاط داغ با احتمال P=0.5 در نظر گرفته‌ایم. بدین معنی که هر گره به احتمال پنجاه درصد بسته‌هایش را به گره‌های داغ ارسال می‌کند. در شبیه‌سازی، گره‌ها به نشانی (2,10),(13,12),(8,5) به‌عنوان گره‌های داغ هستند.

همان‌طور که از شکل‌ها مشخص است، عملکرد معماری‌های CMWNoC به‌طور قابل‌توجهی بهتر از معماری مش سنتی است؛ چون‌که مسافت طی‌شده بین هر دو گره در معماری پیشنهادی به‌کمک اتصالات بلند کاهش یافته است.

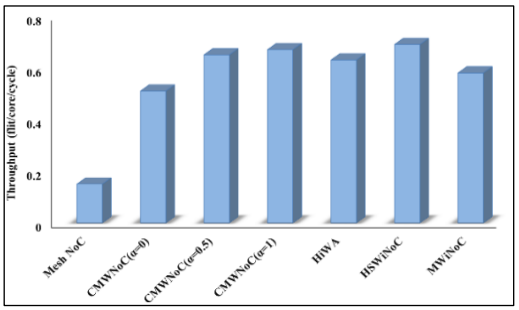
به‌طورکلی، معماری CMWNoC با تعداد پیوندهای بلند بیشتر عملکرد بهتری نسبت به معماری‌های دیگر دارند چون‌که احتمال ازدحام پیوندهای بلند پایین‌تر است. نکته دیگری که از شکل‌ها مشخص می‌شود، این است که معماری‌های CMWNoC تحت ترافیک نقطه داغ عملکرد پایین‌تری نسبت به معماری‌های CMWNoC تحت ترافیک یک‌نواخت دارد. از آنجا که در الگوی ترافیکی نقطه داغ پیوندهای بلند نقش جذب‌کننده ترافیک دارند و احتمال ازدحام پیوندهای بلند بیشتر می‌شود، عملکرد پایین‌تری را مشاهده می‌کنیم.

[2] Uniform
[3] Hot spot

[Downloaded from jsdp.rcisp.ac.ir on 2026-09-15]
[DOI: 10.52547/jsdp.19.1.43]



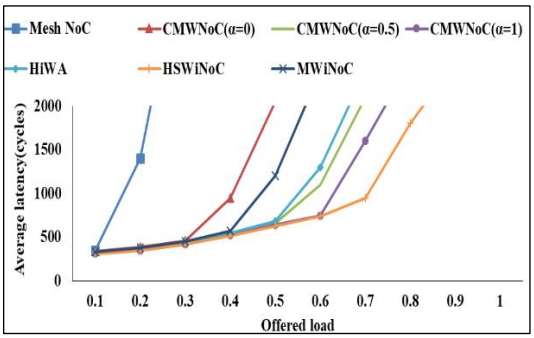
(الف)



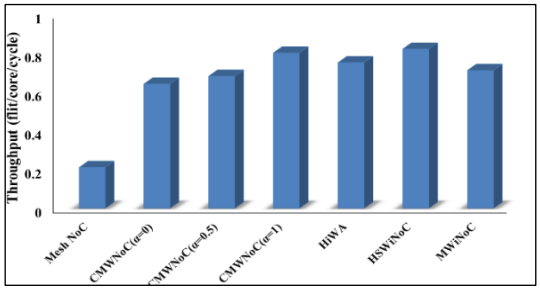
(ب)

(شکل-۵): الف) میانگین تأخیر ارسال، ب) بهره‌وری شبکه معماری‌های مورد مطالعه تحت ترافیک یکنواخت

(Figure-5): (a) Average latency, (b) throughput of the considered architectures under uniform traffic.



(الف)



(ب)

(شکل-۶): الف) میانگین تأخیر ارسال، ب) بهره‌وری شبکه معماری‌های مورد مطالعه تحت ترافیک نقطه داغ

(Figure-6): (a) Average latency, (b) throughput of the considered architectures under hotspot traffic.

در معماری پیشنهادی CMWNoC (وقتی α به سمت یک میل می‌کند) عملکرد بهتری نسبت به معماری‌های HiWA و MwiNoC را به همراه دارد. زیرا معماری CMWNoC با اتصالات بلند بیشتر و سیاست کنترل ازدحام پیشنهادی باعث توزیع بار ترافیکی و کوتاهتر شدن مسافت طی شده بین گره‌ها می‌شود. به هرحال، معماری HSWiNoC عملکرد بهتری دارد چون هر گره یک اتصال مستقیم به دروازه دارد و طول مسیر رسیدن به دروازه را کم می‌کند. هرچند این معماری با مشکل تک نقطه خرابی[1] مواجه است. برای بررسی الگوهای ترافیکی مبتنی بر کاربرد از مجموعه محک COSMIC استفاده شده است [32]. این ابزار رفتار ارتباطی هر کاربرد شامل وابستگی‌های زمانی و مکانی و احتیاجات حافظه‌ای آن را فراهم می‌کند. ابزار COSMIC الگوی ترافیکی هشت کاربرد مختلف را ارائه می‌کند. در این مطالعه، دو ترافیک کاربردی از محک در نظر گرفته شده است. ترافیک نخست مربوط به الگوریتم تصحیح خطا به نام Turbo decoder (Turbo-dec) است که گراف ارتباطی وظیفه این کاربرد، ۳۳۲۵۷ وظیفه (رأس) و ۸۶۲۰۸ پیوندهای ارتباطی (یال) دارد. دومین ترافیک مربوط به کاربرد Ray tracing است که به رندر کردن گرافیک سه بعدی با درجه تفکیک ۱۰×۱۰ پیکسل به نام (RT-10x10) می‌پردازد. در این کاربرد تعداد وظایف و پیوندهای ارتباطی آن به‌ترتیب برابر با ۷۹۸۳ و ۲۰۸۳۸ است [32]. به‌کمک این ابزار نگاشت کاربردها روی هسته‌ها به‌دست می‌آید.

شکل‌های (۷ و ۸) به‌ترتیب میانگین تأخیر ارسال و بهره‌وری اشباع معماری‌های موردمطالعه را برای ترافیک‌های Turbo-dec و RT-10×10 نشان می‌دهند. همان‌طور که مشاهده می‌شود، معماری‌های CMWNoC بهتر از معماری مش سنتی عمل می‌کند؛ زیرا که مسافت طی‌شده بسته‌ها از طریق استفاده از اتصالات بلند کمتر شده است. در اینجا نیز معماری‌های که پیوندهای بلند بیشتری دارند عملکرد بهتری دارند. نکته دیگری که از نتایج استنباط می‌شود، این است که معماری‌های بی‌سیم منجر به بهبود بیشتری برای ترافیک Turbo-dec به نسبت ترافیک RT-10×10 شده است. مهم‌ترین علت این اتفاق این است که وظایف ترافیک Turbo-dec یک‌نواخت‌تر توزیع می‌شود. به عبارت دیگر، تمرکز بیشتر وظایف ترافیک RT-10×10 بر پیوندهای مشخصی از معماری است که باعث بروز ازدحام بیشتر پیوندها می‌شود.

۳-۴- امکان‌پذیری معماری

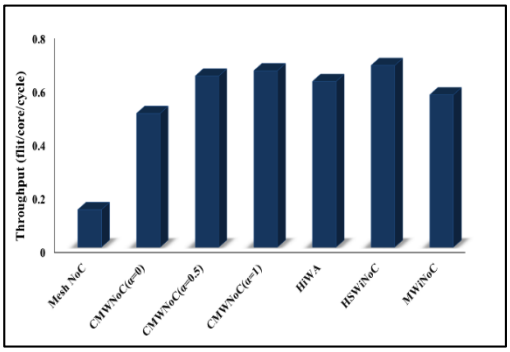
جهت بررسی امکان‌پذیر[2]بودن معماری پیشنهادی، می‌بایست توان مصرفی و سربار مساحتی شبکه مورد

[1] Single point failure
[2] Feasibility

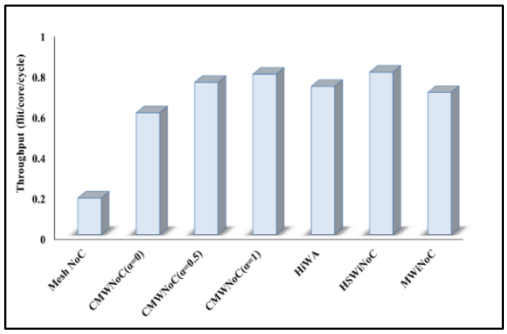
[Downloaded from jsdp.rcisp.ac.ir on 2026-09-15]

[DOI: 10.52547/jsdp.19.1.43]

ارزیابی قرار گیرند. در این پژوهش به تحلیل سطح بالای توان مصرفی شبکه از طریق اضافه‌کردن مدل تخمین توان مصرفی به شبیه‌ساز توسعه داده‌شده، پرداخته شده است؛ علاوه‌براین، مساحت اضافی که معماری پیشنهادی تحمیل می‌کند، مورد بررسی قرار می‌گیرد. توان مصرفی معماری پیشنهادی مربوط به مؤلفه‌های محاسباتی و ارتباطاتی است. توان مصرفی منابع محاسباتی شامل هسته‌های پردازشی و حافظه‌ها به‌کمک ابزار McPAT در شبیه‌ساز JADE به‌دست می‌آید [30]. عمده مصرف توان مؤلفه‌های ارتباطاتی معماری پیشنهادی ناشی از بافرها، پیوندهای ارتباطاتی و جداول مسیریابی است. در این معماری پیوندهای سیمی با طول‌های متفاوتی وجود دارد. اتصالات سیمی براساس مدل پیشنهادی در [31] که مبتنی بر درج تکرارکننده‌ها و اندازه یابی پارامترهای سیم است، طراحی می‌شود. این روش تعیین می‌کند که سیم‌های بلند چگونه با کمترین هزینه پیکربندی می‌شوند تا احتیاجات زمانی سیستم را در یک فرکانس و فناوری مشخص برآورده شود. برای محاسبه توان مصرفی و مساحت مورد نیاز پیوندهای سیمی تنظیم‌شده برای یک فرکانس هدف و فنّاوری معین از ابزار on-chip parallel links calculator [31] استفاده می‌شود.



(الف)

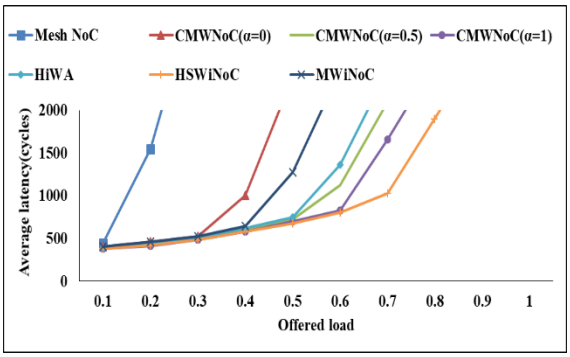


(ب)

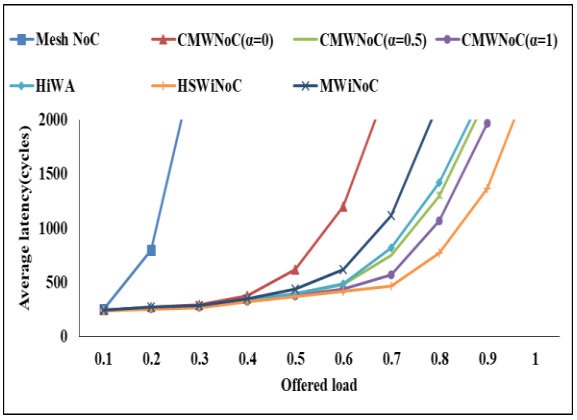
(شکل-۷): الف) میانگین تأخیر ارسال، ب) بهره‌وری شبکه معماری های مورد مطالعه تحت ترافیک Turbo-dec

(Figure-7): (a) Average latency, (b) throughput of the considered architectures under Turbo-dec traffic.

به‌کمک این ابزار توان مصرفی (مجموع توان پویا و ایستا) برای طول‌های مختلف پیوندهای بلند سیمی به‌دست می‌آید. از این ابزار برای به‌دست‌آوردن هزینه مساحتی پیوندهای سیمی بلند نیز استفاده می‌شود. این ابزار پارامترهای پیوندهای بلند سیمی شامل عرض سیم، فاصله و اندازه تکرارکننده را به‌دست می‌آورد. انرژی مصرفی اتصالات بی‌سیم از طریق تحلیل نتایج پژوهش‌های گذشته به‌دست می‌آید.



(الف)



(ب)

(شکل-۸): الف) میانگین تأخیر ارسال، ب) بهره‌وری شبکه معماری‌های مورد مطالعه تحت ترافیک RT-10×10

(Figure-8): (a) Average latency, (b) throughput of the considered architectures under RT-10×10 traffic.

در مرجع [10] بیان شده که انرژی مصرفی برای طولانی‌ترین پیوند بی‌سیم به طول ۲۳ میلی‌متر با نرخ ۱۰ گیگا بیت بر ثانیه برابر با ۰/۳۳ پیکو ژول است. با فرض کانال خط مستقیم در فاصله میلی‌متری بین آنتن‌ها و اتلاف مسیر فضای آزاد[1]، توان مصرفی اتصالات بی‌سیم به دست می‌آید. همچنین، برای تخمین سربار مساحتی پیوندهای بی‌سیم، از نتایج آزمایش‌های مرجع [10] استفاده شده است. در این مرجع گزارش شده اکه مساحت

[1] Free-space path loss

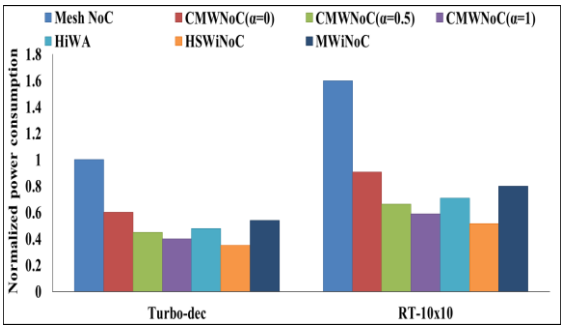
[Downloaded from jsdp.rcisp.ac.ir on 2026-09-15]

[DOI: 10.52547/jsdp.19.1.43]

یک پیوند بی‌سیم برابر با ۱۵۱ میکرومتر مربع است که این مساحت شامل فرستنده و گیرنده بی‌سیم، مادولاتور، دی مادولاتور و تقویت‌کننده نویز پایین است.

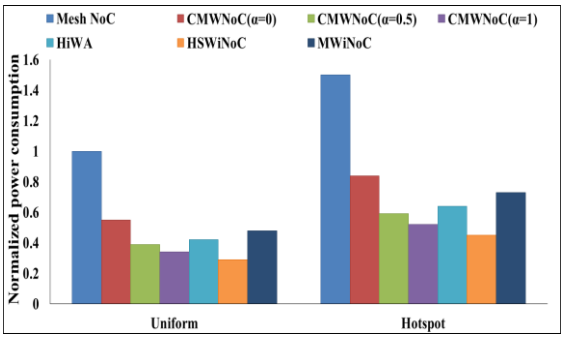
برای تخمین توان مصرفی بافرها و سوئیچ‌ها معماری از ابزار Orion2 [33] اصلاح‌شده استفاده شده است. مصرف انرژی یک بافر ۶۴ بیتی برابر ۴/۴۸ پیکو ژول تخمین زده شده است. همچنین، فرض شده است که پیاده‌سازی جداول مسیریابی با استفاده از سلول‌های SRAM با قابلیت پیکربندی انجام می‌گیرد. مصرف انرژی یک سلول هشت بیتی SRAM برابر با ۰/۱۹ میکرو وات تخمین زده شده است [20]. به‌منظور تخمین سربار مساحتی بافرها و سوئیچ‌های کراس بار نیز از ابزار Orion2 اصلاح‌شده استفاده می‌شود. با این ابزار، مساحت یک بافر ۶۴ بیتی برابر با ۰/۰۰۳۲۶۳ میلی‌متر مربع است. مساحت سوئیچ‌ها با اندازه‌های مختلف با استفاده از این نرم‌افزار تخمین زده می‌شود، علاوه‌براین، با فرض اینکه هر سلول SRAM همراه با مدارهای کنترلی آن در فناوری ۴۵ نانومتر برابر با ۱/۷۸ میکرومتر مربع باشد [20]، سربار مساحتی جداول مسیریابی تخمین زده می‌شود.

برای تحلیل توان مصرفی و سربار مساحتی معماری پیشنهادی، مدل توان مصرفی و مساحتی شرح داده شده به شبیه‌ساز توسعه داده‌شده JADE اضافه می‌شود. شکل (۹) مقایسه مصرف توان معماری‌های مختلف برای ترافیک‌های ترکیبی یک‌نواخت و نقطه داغ را نمایش می‌دهد. مقادیر توان مصرفی به‌دست‌آمده در نقطه اشباع نسبت به مقدار توان مصرفی معماری مش سنتی در نقطه اشباع تحت ترافیک یک‌نواخت نرمالایز شده است. شکل (۱۰) مقایسه مصرف توان معماری‌های مختلف برای ترافیک‌های واقعی شامل Turbo decoder و Ray tracing را نمایش می‌دهد. مقادیر توان مصرفی به‌دست‌آمده در نقطه اشباع نسبت به مقدار توان مصرفی معماری مش سنتی در نقطه اشباع تحت ترافیک Turbo-decoder نرمالایز شده است. همان‌طور که نتایج نشان می‌دهد، معماری‌های CMWNoC به مراتب مصرف توان کمتری نسبت به معماری مش سنتی دارد. علت اصلی آن، امتیازات معماری پیشنهادی در بهره‌گیری از پیوندهای بلند و کاهش تأخیر ارسال بسته‌ها است. در این معماری‌ها، بسته‌ها تعداد گام کمتر و به تبع از تعداد واحدهای عملیاتی کمتری عبور می‌کنند. معماری CMWNoC با داشتن تعداد پیوندهای بی‌سیم بیشتر مصرف توان کمتری دارند؛ علاوه‌براین، به‌علت احتمال رخداد ازدحام بیشتر اتصالات بی‌سیم در الگوی ترافیکی نقاط داغ، توان مصرفی معماری بیشتر است. همچنین، به‌علت متمرکزشدن بار ترافیکی Ray tracing در پیوندهای مشخص، معماری تحت الگوی Ray tracing توان مصرفی بیشتری نسبت به Turbo decoder دارد. معماری پیشنهادی (وقتی α به سمت یک میل می‌کند) به‌علت داشتن تعداد پیوند بیشتر و سیاست کنترل ازدحام، توان مصرفی کمتری نسبت به معماری‌های HiWA و MWiNoC دارد. به‌هرحال معماری HSWiNoC توان مصرفی کمتر است که ناشی از کاهش تأخیر ارسال بسته‌ها در این معماری است.



(شکل-۹): مقایسه میانگین توان مصرفی معماری‌های مورد مطالعه تحت ترافیک‌های یکنواخت و نقطه داغ

(Figure-9): Comparison of average power consumption of the considered architectures under uniform and hotspot traffics.



(شکل-۱۰): مقایسه میانگین توان مصرفی معماری‌های مورد مطالعه تحت ترافیک‌های Turbo-dec و RT-10×10

(Figure-10): Comparison of average power consumption of the considered architectures under Turbo-dec and RT-10×10 traffics.

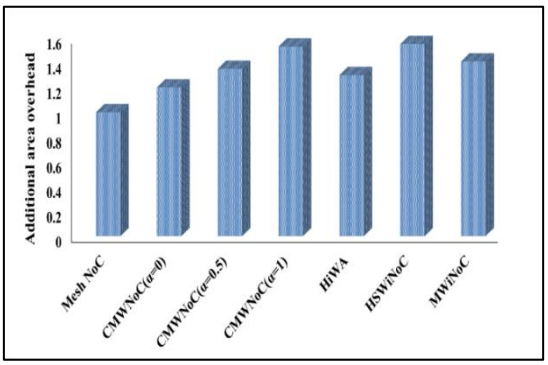
شکل (۱۱) مقایسه هزینه مساحتی معماری‌های مورد مطالعه را نشان می‌دهد. مقادیر نسبت به مساحت معماری مش سنتی نرمالایز شده است. همان‌طور که انتظار می‌رود سربار مساحتی معماری CMWNoC با α=1 بالا است؛ زیرا این معماری دارای تعداد پیوندهای بلند بیشتری است و درنتیجه منابع بافر بیشتری و تعداد

[Downloaded from jsdp.rcisp.ac.ir on 2026-09-15]

[DOI: 10.52547/jsdp.19.1.43]

سوئیچ‌های با اندازه بزرگ بیشتری نیاز دارد. در معماری‌های نرمال بی‌سیم، هزینه مساحت اضافه‌شده معماری HSWiNoC نسبت به معماری‌های دیگر بیشتر است. زیرا تعداد درگاه دروازه‌ها زیاد است و همچنین با توجه به اتصالات هسته به دروازه، تعداد پیوندهای بیشتری وجود دارد. همان‌گونه که می‌بینیم، معماری HiWA هزینه مساحتی کمی را تحمیل می‌کند؛ زیرا به‌طور متوسط تعداد پیوندها کمتری دارد و همچنین تعداد مسیریاب با تعداد درگاه زیاد کمی وجود دارد.

نتایج حاکی از عملکرد مناسب معماری پیشنهادی در کاهش مصرف توان و افزایش بهره‌وری شبکه در سیستم چندپردازنده‌ای روی تراشه می‌باشد. چنین سیستم‌های با تعداد زیاد هسته‌ها می‌تواند در کاربردهایی که نیازمند سرعت و حجم بسیار بالای پردازش داده هستند (همانند، پردازش داده‌های هواشناسی، شبکه‌های اجتماعی، تحلیل داده‌های فضایی،...) مورد استفاده قرار گیرند.



(شکل-۱۱): مقایسه سربار مساحتی معماری‌های مورد مطالعه

(Figure-11): Comparison of area overhead of the considered architectures

۵- نتیجه‌گیری

در این مقاله قسمت‌های مختلف یک معماری ترکیبی آگاه از ازدحام WNoC شامل توپولوژی، زیرساخت فیزیکی و سازو کار آگاه از ازدحام ارتباطی سیمی/بی‌سیم برای سیستم‌های چندپردازنده‌ای روی تراشه ارائه شد. این معماری با توجه یک ساختار سلسله‌مراتبی مبتنی بر مش استاندارد ارائه می‌کند. در این ساختار با توجه به معیارهای کارایی و هزینه مساحتی، تعدادی از مسیریاب‌های ساختار مِش مجهز به اتصالات بلند سیمی و بی‌سیم می‌شوند که این مسیریاب‌ها دروازه نامیده می‌شوند. شبکه ارتباطاتی بین دروازه‌ها دارای خاصیت گراف دنیای کوچک است. برای مدیریت ازدحام الگوریتم‌های ارتباطاتی مبتنی بر امتیازدهی مسیرها ارائه شد؛ به‌نحوی که مسیرهای دارای ازدحام در طول زمان امتیاز کمتری می‌گیرند تا در ارتباطات کمتر استفاده شوند. ارزیابی نتایج بیان‌گر این است که معماری پیشنهادی با کمک میانبرهای بی‌سیم سریع کم توان، کارایی بالاتری نسبت به معماری سنتی مش دارد. همچنین، مقایسه معماری پیشنهادی با معماری‌های قابل توجه بی‌سیم دیگر حاکی از پتانسیل معماری پیشنهادی در رقابت با آن معماری‌های است. علت اصلی آن در قرارگیری مناسب مسیریاب‌های بی‌سیم، سیاست کنترل ازدحام پیشنهادی و تعداد اتصالات بلند زیاد معماری است. به هرحال معماری ارائه‌شده سازوکاری برای تحمل پذیری خرابی و تضمین کیفیت سرویس ندارد؛ همچنین، با افزایش تعداد هسته‌ها، به اتصالات بی‌سیم بیشتری نیاز است که در نتیجه هزینه دسترسی به رسانه بی‌سیم و سربار مساحتی افزایش می‌یابد. این موارد می‌تواند به‌عنوان کارهای آینده مورد بررسی قرار گیرد.

۶- مراجع 6- References

[1] "2013 ITRS Edition." [Online]. Available: http://www.itrs.net/Links/2013ITRS/Home2013.htm. [Accessed: 02-Mar-2019].

[2] A. Rezaei, M. Daneshtalab, F. Safaei, and D. Zhao, "Hierarchical approach for hybrid wireless Network-on-chip in many-core era," *Comput. Electr. Eng.*, vol. 51, pp. 225–234, Apr. 2016.

[3] P. P. Pande, C. Grecu, M. Jones, A. Ivanov, and R. Saleh, "Performance evaluation and design trade-offs for network-on-chip interconnect architectures," *IEEE Trans. Comput.*, vol. 54, no. 8, pp. 1025–1040, Aug. 2005.

[4] A. Shacham, K. Bergman, and L. P. Carloni, "Photonic networks-on-chip for future generations of chip multiprocessors," *IEEE Trans. Comput.*, vol. 57, no. 9, pp. 1246–1260, Sep. 2008.

[5] D. W. Matolak, A. Kodi, S. Kaya, D. Ditomaso, S. Laha, and W. Rayess, "Wireless networks-on-chips: Architecture, wireless channel, and devices," *IEEE Wirel. Commun.*, vol. 19, no. 5, pp. 58–65, Oct. 2012.

[6] A. B. Kaplan, "Architectural Integration of RF-Interconnect to Enhance On-Chip Communication for Many-Core Chip Multiprocessors", PhD Thesis, Dept. of Computing Science, University of California, Los Angeles, 2008.

[7]D. DiTomaso, A. Kodi, D. Matolak, S. Kaya, S. Laha, and W. Rayess, "A-WiNoC: Adaptive Wireless Network-on-Chip Architecture for Chip Multiprocessors," *IEEE Trans. Parallel*

[Downloaded from jsdp.rcisp.ac.ir on 2026-09-15]

[DOI: 10.52547/jsdp.19.1.43]

Distrib. Syst.*, vol. 26, no. 12, pp. 3289–3302, Dec. 2015.

[8] K. Chang *et al.*, "Performance evaluation and design trade-offs for wireless network-on-chip architectures," *ACM J. Emerg. Technol. Comput. Syst.*, vol. 8, no. 3, pp. 1–25, Aug. 2012.

[9] S. H. Gade and S. Deb, "HyWin: Hybrid Wireless NoC with Sandboxed Sub-Networks for CPU/GPU Architectures," *IEEE Trans. Comput.*, vol. 66, no. 7, pp. 1145–1158, Jul. 2017.

[10] A. Ganguly, K. Chang, S. Deb, P. P. Pande, B. Belzer, and C. Teuscher, "Scalable hybrid wireless network-on-chip architectures for multicore systems," *IEEE Trans. Comput.*, vol. 60, no. 10, pp. 1485–1502, Oct. 2011.

[11] A. Rezaei, M. Daneshtalab, M. Palesi, and D. Zhao, "Efficient Congestion-Aware Scheme for Wireless on-Chip Networks," in *2016 24th Euromicro International Conference on Parallel, Distributed, and Network-Based Processing (PDP)*, 2016, pp. 742–749.

[12] C. Wang, W. H. Hu, and N. Bagherzadeh, "A load-balanced congestion-aware wireless network-on-chip design for multi-core platforms," *Microprocess. Microsyst.*, vol. 36, no. 7, pp. 555–570, Oct. 2012.

[13] B. A. Floyd, C. M. Hung, and K. K. O, "Intra-chip wireless interconnect for clock distribution implemented with integrated antennas, receivers, and transmitters," *IEEE J. Solid-State Circuits*, vol. 37, no. 5, pp. 543–552, May 2002.

[14] 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," *IEEE Trans. Comput.*, vol. 57, no. 9, pp. 1230–1245, Sep. 2008.

[15] D. Zhao, Y. Wang, J. Li, and T. Kikkawa, "Design of multi-channel wireless NoC to improve on-chip communication capacity!," in *Proceedings of the Fifth ACM/IEEE International Symposium*, 2011, pp. 177–184.

[16] S. B. Lee *et al.*, "A scalable micro wireless interconnect structure for CMPs," in *Proceedings of the 15th annual international conference on Mobile computing and networking - MobiCom '09*, 2009, pp. 217.

[17] D. DiTomaso, A. Kodi, S. Kaya, and D. Matolak, "IWISE: Inter-router wireless scalable express channels for Network-on-Chips (NoCs) architecture," in *Proceedings - Symposium on the High Performance Interconnects, Hot Interconnects*, 2011, pp. 11–18.

[18] A. Dehghani and K. Jamshidi, "A fault-tolerant hierarchical hybrid mesh-based wireless network-on-chip architecture for multicore platforms," *J. Supercomput.*, vol. 71, no. 8, 2015.

[19] S. Deb *et al.*, "Design of an energy-efficient CMOS-compatible NoC architecture with millimeter-wave wireless interconnects," *IEEE Trans. Comput.*, vol. 62, no. 12, pp. 2382–2396, Dec. 2013.

[20] A. Dehghani and K. Jamshidi, "A Novel Approach to Optimize Fault-Tolerant Hybrid Wireless Network-on-Chip Architectures," *J. Emerg. Technol. Comput. Syst.*, vol. 12, no. 4, pp. 45:1--45:37, Mar. 2016.

[21] R. G. Kim *et al.*, "Wireless NoC for VFI-Enabled Multicore Chip Design: Performance Evaluation and Design Trade-Offs," *IEEE Trans. Comput.*, vol. 65, no. 4, pp. 1323–1336, Apr. 2016.

[22] J. Murray, R. Kim, P. Wettin, P. P. Pande, and B. Shirazi, "Performance evaluation of congestion-aware routing with DVFS on a millimeter-wave small-world wireless NoC," *ACM J. Emerg. Technol. Comput. Syst.*, vol. 11, no. 2, Oct. 2014.

[23] R. Kim, J. Murray, P. Wettin, P. P. Pande, and B. Shirazi, "An energy-efficient millimeter-wave wireless NoC with congestion-aware routing and DVFS," in *Proceedings - 2014 8th IEEE/ACM International Symposium on Networks-on-Chip, NoCS 2014*, 2015, pp. 192–193.

[24] Y. *Ouyang*, Z. Li, K. Xing, Z. Huang, H. Liang, and J. Li, "Design of Low-Power WiNoC with Congestion-Aware Wireless Node," *J. Circuits, Syst. Comput.*, vol. 27, no. 9, Aug. 2018.

[25] U. Y. Ogras and R. Marculescu, "'It's a small world after all': NoC performance optimization via long-range link insertion," *IEEE Trans. Very Large Scale Integr. Syst.*, vol. 14, no. 7, pp. 693–706, Jul. 2006.

[26] P. Wettin, A. Vidapalapati, A. Gangul, and P. P. Pande, "Complex network-enabled robust wireless network-on-chip architectures," *ACM J. Emerg. Technol. Comput. Syst.*, vol. 9, no. 3, pp. 1–19, Sep. 2013.

[27] S. Cahon, N. Melab, and E.-G. Talbi, "ParadisEO: A Framework for the Reusable Design of Parallel and Distributed Metaheuristics," *J. Heuristics*, vol. 10, no. 3, pp. 357–380, May 2004.

[28] G. M. Chiu and G. Ming, "The odd-even turn model for adaptive routing," *IEEE Trans. Parallel Distrib. Syst.*, vol. 11, no. 7, pp. 729–738, Jul. 2000.

[29] O. Lysne, T. Skeie, S. A. Reinemo, and I. Theiss, "Layered routing in irregular networks," *IEEE Trans. Parallel Distrib. Syst.*, vol. 17, no. 1, pp. 51–65, Jan. 2006.

[Downloaded from jsdp.rcisp.ac.ir on 2026-09-15]

[DOI: 10.52547/jsdp.19.1.43]

[30] R. K. V. Maeda *et al.*, "JADE: a Heterogeneous Multiprocessor System Simulation Platform Using Recorded and Statistical Application Models," in *Proceedings of the 1st International Workshop on Advanced Interconnect Solutions and Technologies for Emerging Computing Systems - AISTECS '16*, 2016, pp. 1–6.

[31] R. Manevich, L. Polishuk, I. Cidon, and A. Kolodny, "Designing single-cycle long links in hierarchical NoCs," *Microprocess. Microsyst.*, vol. 38, no. 8, pp. 814–825, Nov. 2014.

[32] R. K. V. Maeda, Q. Cai, J. Xu, Z. Wang, and Z. Tian, "Fast and Accurate Exploration of Multi-level Caches Using Hierarchical Reuse Distance," in *2017 IEEE International Symposium on High Performance Computer Architecture (HPCA)*, 2017, pp. 145–156.

[33] A. B. Kahng, B. L. Bin Li, L.-S. P. L.-S. Peh, and K. Samadi, "ORION 2.0: A fast and accurate NoC power and area model for early-stage design space exploration," *2009 Des. Autom. Test Eur. Conf. Exhib.*, pp. 1–6, Apr. 2009.

[34] محبی نجم‌آباد جواد، مرادی مرتضی، سلامی باقر. انتخاب ویژگی پیشنهادی برای مدیریت دمای پویا در سیستم‌های چندهسته‌ای. پردازش علائم و داده‌ها. ۱۳۹۸; ۱۶ (۱) :۱۲۵-۱۴۲.

[34] J. Mohebbi, M. Moradi, B. Salami, "Proposed Feature Selection for Dynamic Thermal Management in Multicore Systems," Signal and Data Processing, . vol. 16, no 1, pp. 125-142, 2019. http://jsdp.rcisp.ac.ir/article-1-801-fa.html.

عباس دهقانی کارشناسی مهندسی رایانه را در سال ۱۳۸۰ از دانشگاه شیراز، کارشناسی ارشد و دکترای مهندسی معماری سیستم‌های رایانه‌ای را به‌ترتیب ۱۳۸۷و ۱۳۹۴ از دانشگاه اصفهان دریافت کرده است. وی هم اکنون عضو هیأت علمی گروه مهندسی برق و کامپیوتر دانشگاه یاسوج است. حوزه‌های پژوهشی مورد علاقه ایشان شامل معماری رایانه، طراحی سیستم‌های روی تراشه و شبکه‌های بی‌سیم روی تراشه است.

نشانی رایانامه ایشان عبارت است از:

Dehghani@yu.ac.ir

کیوان رحیمی‌زاده کارشناسی مهندسی رایانه را در سال ۱۳۸۱ از دانشگاه شیراز، کارشناسی ارشد مهندسی شبکه‌های رایانه‌ای را در سال ۱۳۸۶ از دانشگاه صنعتی امیرکبیر و دکترای معماری سیستم‌های رایانه‌ای را در سال ۱۳۹۴ از دانشگاه علم و صنعت دریافت کرده است. وی هم‌اکنون عضو هیأت علمی گروه مهندسی برق و کامپیوتر دانشگاه یاسوج است. حوزه‌های پژوهشی مورد علاقه ایشان شامل مدل‌سازی و ارزیابی سیستم‌های رایانه‌ای، محاسبات ابری، تحلیل داده‌های کلان و شبکه‌های رایانه‌ای است.

نشانی رایانامه ایشان عبارت است از:

RahimiZadeh@yu.ac.ir

[Downloaded from jsdp.rcisp.ac.ir on 2026-09-15]

[DOI: 10.52547/jsdp.19.1.43]