JOURNAL OF SOUTHERN COMMUNICATION ENGINEERING
ISLAMIC AZAD UNIVERSITY BUSHEHR BRANCH

E-ISSN: 2980-9231
https://jce.bushehr.iau.ir

https://doi.org/10.30495/jce.2023.1992434.1216

Vol. 13/ No. 51/Spring 2024

Research Article

A New Model for Enhancing Efficiency in On-Chip Optical Networks Based on Adaptive Routing Algorithm

Mohammadreza Hemmati, Ph.D. candidate[1] |S. Mohammadali Zanjani, Assistant Professor[2*] | Elham Yaghoubi, Assistant Professor[3]

[1]Faculty of Computer Engineering, Najafabad Branch, Islamic Azad University, Najafabad, Iran. Mr.hemati@sco.iaun.ac.ir

[2]Department of Electrical Engineering, Najafabad Branch, Islamic Azad University, Najafabad, Iran. sma_zanjani@pel.iaun.ac.ir

[3]Faculty of Computer Engineering, Najafabad Branch, Islamic Azad University, Najafabad, Iran. e.yaghoubi@pco.iaun.ac.ir

Correspondence
S. Mohammadali Zanjani[3], Assistant Professor, Smart Microgrid Research Center, Najafabad Branch, Islamic Azad University, Najafabad. sma_zanjani@pel.iaun.ac.ir

Received: 26 July 2023
Revised: 16 September 2023
Accepted: 10 October 2023

Abstract

The lower power consumption, larger communication bandwidth, and reduced latency are advantages of optical networks over electrical communications. However, there are challenges in these networks, such as routing and connectivity issues, which result in increased network size and wastage. As networks become more complex and larger, building on-chip networks brings problems like communication costs between components and the likelihood of unpredictable failures in communication circuits. Therefore, providing an error-tolerant routing algorithm plays a crucial role in the development of on-chip network architecture. In this article, an adaptive fault-tolerant routing algorithm will be presented, whose main objective is to create the ability to handle a reasonable number of faults without disrupting the healthy nodes in the network. The simulation results of message delay in the proposed method show a gradient norm equal to 1.1691E-5 and μ=1E-8 for epoch=280, demonstrating its capability to reduce delay in the network. A very slight change in message delay in evaluating the proposed method also indicates the acceptability of the proposed method. Moreover, the presence of a gradient of 1.527E-3 and μ=1E-7 for epoch=350 in the energy consumption value indicates a reduction in energy consumption compared to conventional methods in existing references, although the proposed system may incur additional overhead compared to some previous methods.

Keywords: Network on-Chip, Adaptive Routing Algorithm, Fault-Tolerant Algorithm, Congestion-Aware Dynamic Routing.

Highlights

- Introducing an adaptive fault-tolerant routing algorithm in interconnection networks with torus topology.
- Enabling the network to handle a significant number of faults without disrupting the healthy nodes.
- Interact with a reasonable number of faults without the need to discard healthy nodes.
- Reduction in message delay, energy consumption, and network cost compared to conventional methods.

Citation: M. Hemmati, S.M. Zanjani, and E. Yaghoubi, "A New Model for Enhancing Efficiency in On-Chip Optical Networks Based on Adaptive Routing Algorithm," *Journal of Southern Communication Engineering*, vol. 13, no. 51, pp. 13–22, 2024, doi: 10.30495/jce.2023.1992434.1216, (in Persian).

مقاله پژوهشی

یک مدل جدید برای افزایش کارایی در شبکه روی تراشه نوری بر اساس الگوریتم مسیریابی تطبیقی

محمدرضا همتی[۱] | سید محمدعلی زنجانی*[۲] | الهام یعقوبی[۳]

[۱]دانشکده مهندسی کامپیوتر، واحد نجف‌آباد، دانشگاه آزاد اسلامی، نجف‌آباد، ایران.
mr.hemati@sco.iaun.ac.ir

[۲]دانشکده مهندسی برق، واحد نجف‌آباد، دانشگاه آزاد اسلامی، نجف‌آباد، ایران.
sma_zanjani@pel.iaun.ac.ir

[۳]دانشکده مهندسی کامپیوتر، واحد نجف‌آباد، دانشگاه آزاد اسلامی، نجف‌آباد، ایران.
e.yaghoubi@pco.iaun.ac.ir

نویسنده مسئول: *سید محمدعلی زنجانی، استادیار، مرکز تحقیقات ریزشبکه‌های هوشمند، واحد نجف‌آباد، دانشگاه آزاد اسلامی، نجف‌آباد، ایران.
sma_zanjani@pel.iaun.ac.ir

چکیده:

توان مصرفی کمتر، پهنای باند ارتباطی بزرگ‌تر و تأخیر کمتر از مزایای شبکه‌های نوری نسبت به ارتباطات الکتریکی است؛ اما چالش‌هایی مانند مسیریابی و هم‌بندی در این شبکه‌ها وجود دارد به نحوی‌که برای ارسال داده، نیاز به پیمودن گام‌های زیادی است که باعث بزرگ‌تر شدن شبکه و اتلاف می‌شود. با پیچیده‌تر شدن و بزرگ‌تر شدن شبکه‌ها، در ساخت شبکه روی تراشه، مشکلاتی نظیر هزینه ارتباطات بین اجزاء و احتمال بروز هر خرابی غیر قابل پیش‌بینی در مدارهای ارتباطی وجود دارد. از این رو ارائه یک الگوریتم تحمل‌پذیر خطا، نقش مهمی در گسترش معماری شبکه روی تراشه دارد. در این مقاله، یک الگوریتم مسیریابی تطبیقی تحمل‌پذیر اشکال ارائه خواهد شد که هدف اصلی آن، ایجاد توانایی جهت تعامل با تعداد قابل قبولی اشکال بدون از کار انداختن گره‌های سالم در شبکه است. نتایج حاصل از شبیه‌سازی تأخیر پیام در روش پیشنهادی، μ برابر با ۱×۱۰^{-۵} و گرادیان برابر $۱/۱۶۹\times۱۰^{-۵}$ به ازای epotch مساوی با ۲۸۰ است که توانایی آن را در کاهش تأخیر بر روی شبکه اثبات می‌نماید. تغییر بسیار جزئی تأخیر پیام در ارزیابی روش پیشنهادی، نیز نشانگر قابل قبول بودن روش پیشنهادی است. همچنین، وجود μ برابر با ۱×۱۰^{-۷} و گرادیان برابر $۱/۵۲۷\times۱۰^{-۳}$ به‌ازای epotch مساوی با ۳۵۰ در مقدار انرژی مصرفی، بیانگر کاهش انرژی مصرفی نسبت به روش‌های مرسوم در مراجع موجود است، هرچند احتمالا سربار سامانه پیشنهادی نسبت به برخی روش‌های قبلی افزایش می‌یابد.

کلیدواژه‌ها: شبکه روی تراشه، الگوریتم مسیریابی تطبیقی، الگوریتم تحمل‌پذیر خطا، مسیریابی پویای آگاه از ازدحام.

تاریخ دریافت: ٤مرداد ۱٤۰۲
تاریخ بازنگری: ۲۵ شهریور ۱٤۰۲
تاریخ پذیرش: ۱۸ مهر ۱٤۰۲

https://doi.org/10.30495/jce.2023.1992434.1216

۱-مقدمه

با ورود به عرصه ساخت قطعات مجتمع در مقیاس بزرگ و پیشرفت فناوری، سامانه‌های روی شبکه[۱] قادر به مدیریت بهینه منابع اطلاعات (شامل پردازنده‌ها، حافظه‌ها، پردازنده های سیگنال دیجیتال[۲] و ...) نخواهند بود؛ لذا مفهوم شبکه‌های روی تراشه[۳] برای بهبود ارتباط بین اجزاء شبکه مطرح شد [۱]. از طرفی طراحی ساختارهای کم مصرف جدید، اعم از فناوری‌های جدید نوری و یا ترانزیستورهای جدید، مانند ترانزیستورهای اثر میدان نانو لوله کربنی، نیز از اولویت‌های طراحان شده است [۳،۲]. علاوه بر طراحی معماری مناسب برای شبکه و ایجاد ساختاری منظم، الگوریتم‌های مسیریابی ارائه شده نیز تا حد زیادی کارایی شبکه‌های

[1] System on Chips (SoCs)
[2] DSP
[3] Network on Chip (NoC)

روی تراشه را تحت تأثیر قرار می‌دهند. در واقع شبکه روی تراشه، یک زیربنای جدید ارتباطی برای سامانه روی تراشه است. به طور گسترده، شبکه بر تراشه به‌عنوان یک طرح ارتباطاتی در سامانه‌های چندهسته‌ای مدرن، با هدف تضمین قابلیت اطمینان[1] ارتباطات استفاده می‌شود. درنتیجه، روش‌های تحمل خطای مؤثر در شبکه بر تراشه، از اهمیت بالایی برخوردار هستند. با توجه به مقیاس‌پذیری بالا و یکپارچه‌سازی موازیِ ارائه شده توسط شبکه روی تراشه از طریق سامانه‌های سنتی مبتنی بر اشتراک-گذاری گذرگاه، هنوز یک راه‌حل ایده‌آل در سامانه‌های با مقیاس بالا بر روی تراشه، وجود ندارد.

همان‌طور که فناوری در حال رشد است، قابلیت اطمینان به یکی از چالش‌های کلیدی شبکه بر تراشه تبدیل شده است. بسیاری از الگوریتم‌های تحمل‌پذیر خطا در شبکه بر تراشه برای غلبه بر عیوب، توسعه یافته‌اند و یک انتقال مطمئن را فراهم می‌کنند. اما الگوریتم مسیریابی پیشنهادی توجه زیادی به پیدا کردن مسیرهای کوتاه ندارد. چندین الگوریتم تحمل‌پذیر خطا که از روش‌هایی همچون حالات انتشار مبتنی بر دورترین مسیریاب قابل‌دسترسی بهره می‌برند، در [۴] بررسی شده‌اند. در همین مرجع، برای قابلیت تحمل‌پذیری خطا برای شبکه‌های روی تراشه، از طریق سازوکار مسیریابی، یک الگوریتم جدید مسیریابی تطبیقی کارآمد پیشنهاد شده است. این الگوریتم، مبتنی بر انتخاب مسیر وزن‌دار است که از طریق پیمانه‌های نظارتی از ترافیک واقعی شبکه بر تراشه استفاده می‌کند. هدف اصلی این الگوریتم، استفاده از تصمیم‌گیری‌های مسیریابی برای حفظ توان عملیاتی سیستم، تحت شرایط خطادار است. در الگوریتم مسیریابی تحمل‌پذیر خطا با توجه به هزینه کم پیشنهاد شده، در زمان واقعی طبق وضعیت کانال بیکار/مشغول/خطادار، وزن‌های پورت‌ها محاسبه شده است و بر اساس مسیر بهینه نزدیک به بسته‌ها، پورت با کم‌ترین وزن، مرتب شده است. این روش مسیریاب را قادر به کنارگذاشتن پورت‌های متراکم و تحمل‌کردن پورت‌های خطادار می‌کند. برای ارزیابی زمان تأخیر و توان عملیاتی الگوریتم پیشنهادی، چندین الگوی ترافیک برای هر دو شبکه بر تراشه بدون خطا و خطادار بررسی شده است. نتایج نشان داده است که مسیریابی با هزینه کم، توان عملیاتی بالاتری را نسبت به سایر الگوریتم‌های مسیریابی تحت الگوهای ترافیک مختلف و سطوح مختلف خطا دارد. به‌علاوه، سربار سخت‌افزاری، هزینه کمی دارد که موجب مقیاس‌پذیری شبکه بر تراشه در مقیاس بزرگ شده است. برای غلبه بر خرابی‌های دائمی در مسیریابی‌های بسته و برای کاهش خرابی‌ها، نیاز به شناسایی اجزای خراب است.

الگوریتم‌های مسیریابی به طور معمول، نواحی معیوب را با مسیریابی مجدد دور می‌زنند؛ بنابراین مسیر انتخابی همیشه کوتاه‌ترین مسیر نیست. در یک مش دوبعدی، هر لینک دو همسایه مستقیم غربی و شرقی یا شمالی و جنوبی دارد و چهار همسایه غیرمستقیم که مثلاً برای شمال و جنوب شامل شمال غربی و شمال شرقی و جنوب غربی و جنوب شرقی هستند. لینک، یک حریم فاصله دارد که شامل تمامی مسیرهایی است که به آن منتهی شده یا از آن عبور می‌کنند. ضمناً باید بتوان به یک الگوریتم مسیریابی مقابله با خطا دست یافت که بسته‌ها را از مسیری بدون حلقه در اطراف منطقه‌ای که مشکل رخ داده است، به مقصد هدایت کند. الگوریتم‌های مسیریابی قطعی و انطباقی، روش‌های انتخاب مسیر و روش‌های تشخیص مسیر بر اساس تعداد خطای بیشتر، حائز اهمیت هستند [۶-۴].

یک مشخصه کلیدی بر روی تراشه در سامانه‌های چندهسته‌ای، قابل اطمینان بودن ارتباط است. الگوی شبکه روی تراشه باید این اطمینان را از خود نشان دهد. ازآنجایی‌که فناوری نیمه‌رساناها در مقیاس زیرمیکرون و فرکانس گیگاهرتز در حال اجرا هستند، بسیار مستعد به شکست هستند. در نتیجه، اطمینان به شبکه روی تراشه با استرس بیشتری روبه‌رو شده است [۷، ۸]. منظور از اطمینان آن است که بعد از بررسی حلقه، هزینه، مسیرهای خطادار و غیر قابل استفاده، وقتی مسیری جایگزین مسیر دیگر شد و در مسیر جدید خطا اتفاق افتاد، آیا بسته به مقصد خواهد رسید؟

در ادامه و در بخش دوم، توسط روش‌های مختلف، الگوریتم‌های مسیریابی (شامل الگوریتم ترکیبی، مسیریابی همسایه، الگوریتم آگاه از ترافیک، مسیریابی پویای محموله‌ای، مسیریابی مبتنی بر جدول، الگوریتم مسیریابی آگاه از ازدحام و مسیریابی پویای تحمل‌پذیر در برابر خطا) بررسی می‌شوند و درنهایت، با فرض متمرکز بودن اطلاعات اشکالات شبکه، شبه‌کد الگوریتم مسیریابی تطبیقی نوشته می‌شود. در بخش سوم، با فرض یک شبکه از نوع ۸*۸ به معرفی الگوریتم مسیریابی تحمل‌پذیر اشکال ایستا در شبکه‌های میان ارتباطی با هم‌بندی توری و در حضور الگوهای اشکال کوژ و کاو پیشنهادی پرداخته می‌شود. نتایج شبیه‌سازی

[1] Reliability

در بخش ۴ نشانگر نوآوری روش ارائه شده است؛ به نحوی که می‌تواند با تعداد معقولی از اشکالات بدون نیاز به از کار انداختن گره‌های سالم، کارآیی بالایی را با استفاده از مسیریابی تطبیقی و تنها به کمک ۴ کانال مجازی فراهم کند. بخش ۵ به نتیجه‌گیری و پیشنهاد برای ادامه کار می‌پردازد.

۲- مسیریابی پویای آگاه از ازدحام

مسیریابی پویای آگاه از ازدحام CADR[1] یک تکنیک مسیریابی است که هدف آن بهینه‌سازی جریان ترافیک شبکه با در نظر گرفتن سطوح تراکم در زمان واقعی است. پروتکل‌های مسیریابی سنتی، معمولاً مسیرها را بدون در نظر گرفتن سطوح ازدحام واقعی در پیوندهای شبکه، بر اساس معیارهای ثابت مانند کوتاه‌ترین مسیر یا حداقل تعداد پرش انتخاب می‌کنند. این می‌تواند به توزیع نامتعادل ترافیک شبکه و افزایش ازدحام در مناطق خاص منجر شود. از سوی دیگر، CADR وضعیت تراکم فعلی پیوندهای شبکه را در نظر می‌گیرد و مسیرهای مسیریابی را به صورت پویا تنظیم می‌کند. از اطلاعات بلادرنگ در مورد شرایط شبکه، مانند استفاده از لینک، نرخ از دست دادن بسته، یا تأخیر در صف، برای تصمیم‌گیری در مسیریابی استفاده می‌کند. با انجام این کار، CADR می‌تواند به طور مؤثر ترافیک را در سراسر شبکه توزیع کند و از مناطق شلوغ و یا استفاده از لینک‌های کم استفاده جلوگیری کند [۹].

هدف اصلی CADR بهینه‌سازی عملکرد شبکه با کاهش تراکم و بهبود کارایی شبکه است. با انطباق پویای مسیرها، مسیریابی بر اساس اطلاعات ازدحام در زمان واقعی، CADR می‌تواند به دستیابی به تعادل بار بهتر، کاهش از دست دادن بسته‌ها، کاهش تأخیر و بهبود کیفیت کلی خدمات کمک کند [۱۰].

CADR می‌تواند به ویژه در شبکه‌های مقیاس بزرگ مفید باشد، جایی که ازدحام می‌تواند به دلیل عوامل مختلفی مانند تقاضای ترافیک بالا، خرابی پیوندها یا تغییرات توپولوژی شبکه رخ دهد. با نظارت مستمر و تطبیق مسیرهای مسیریابی، CADR می‌تواند به تغییرات در شرایط شبکه پاسخ دهد و ترافیک را به مسیرهای با شلوغی کمتر تغییر مسیر دهد و از انتقال روان‌تر و کارآمدتر داده‌ها، اطمینان حاصل کند. به طور کلی، CADR یک رویکرد پیشگیرانه برای مسیریابی شبکه است که اطلاعات تراکم در زمان واقعی را برای بهینه‌سازی جریان ترافیک، به حداقل رساندن ازدحام و افزایش عملکرد شبکه در نظر می‌گیرد [۱۱]. الگوریتم‌های مسیریابی پویای آگاه از ازدحام توسط روش‌های مختلف مورد بررسی قرار گرفته‌اند که در زیر توضیح داده شده است.

۱) الگوریتم‌های مسیریابی ترکیبی: یک طرح مسیریابی پویا به نام DYAD می‌تواند بر اساس شرایط ازدحام سیستم، بین الگوریتم‌های مسیریابی قطعی و الگوریتم‌های مسیریابی تطبیقی سوئیچ کند. به‌عنوان‌مثال، مزایای این دو الگوریتم ترکیب می‌شوند. به طور مشابه DYXY الگوریتم مسیریابی تطبیقی است که مبتنی بر شرایط ازدحام است و کارایی بهتری نسبت به XY و مسیریابی زوج و فرد دارد.

۲) یک روش دیگر مسیر آگاه، در [۱۲] معرفی شده است و پس از گرفتن کاندیداهای مناسب اول یا مسیریابی زوج و فرد، پورت مناسب خروجی را انتخاب می‌کند.

۳) استفاده از شبکه اختصاصی یا سیگنال‌ها برای جمع‌آوری وضعیت ترافیک یک الگوریتم مسیریابی همسایه مبتنی بر مسیر (NOP) از سیم‌های اختصاص داده شده برای تشخیص وضعیت ترافیک گره‌های همسایه استفاده می‌کند. این روش یک بهبود کارایی در میانگین تأخیر و توان عملیاتی به‌خصوص در بار ترافیک سنگین داشته است.

۴) در [۱۳] مسیریاب شبکه روی تراشه از نوع آگاه از ترافیک، از سیم‌های سیگنال اختصاص داده شده برای نشان دادن وضعیت ترافیک کانال استفاده می‌کند که منطبق بر تراکم ترافیک است.

۵) الگوریتم مسیریابی XY پویای پیشرفته، دو سیم اختصاص داده شده را در هر کانال اضافه می‌کند تا نشان دهد وضعیت ازدحام کانال‌ها در همان ردیف یا ستون به عنوان مسیریاب جاری است. این سیم‌های متراکم، مسیریاب را قادر به جلوگیری از مسیر همسایه شلوغ می‌کند. یک طرح مسیریابی آگاه از مسیر برای انتشار اطلاعات ترافیک، یک زیرشبکه آگاه از ازدحام را به کار می‌برد و به مسیریابی کمک می‌کند. چالش اصلی، نیاز به سربار اضافی است که شبکه دیگری برای انتشار اطلاعات ترافیک کمک می‌کند [۱۵،۱۴].

[1] Congestion-Aware Dynamic Routing

۶) مسیریابی محموله‌ای، یک سیاست شکستن اولویت وزن است. هر بسته، وزنی دارد که بر اساس طول عمر، فاصله و اولویت اولیه بسته محاسبه شده است. سیاست شکستن اولویت وزن در اکثر مواقع عملکرد خوبی دارد. این سیاست تنها به کمک شبیه‌ساز زبان C ارزیابی شده است و عملکرد سخت‌افزار برای مقیاس‌پذیری که چالش کلیدی شبکه بر تراشه است، در دسترس نیست. علاوه بر مسیریابی محموله‌ای، چند الگوریتم مسیریابی تطبیقی غیرمستقیم نیز در رویکردها بیان شده است که عملکرد خوبی تحت بارهای حالت گذرا و پایدار در ساختار سنجاقک داشته‌اند [۱۶].

۷) مسیریابی مبتنی بر جدول، یک سازوکار مسیریابی تطبیقی متمرکز است که در آن یک جدول مسیریابی در هر گره به کار رفته است. این سازوکار از یک پیمانه فیدبک برای نظارت وضعیت ترافیک عمومی و یک پیمانه کنترل برای تصمیم‌گیری مسیریابی استفاده کرده است. اگر وضعیت ترافیک در طی زمان انتشار بسته‌ها از منبع به مقصد تغییر کند، این سازوکار فرصتی برای خروج داده‌ها فراهم می‌کند. چالش این روش، سربار سیم اختصاص داده شده است. به‌منظور کاهش سربار، یک الگوریتم مسیریابی آگاه از ازدحام، اطلاعات ترافیک را در بسته‌ها جاسازی می‌کند. هر گره پس از دریافت اطلاعات ترافیک، نقشه ازدحام خود را به‌روزرسانی می‌کند، سپس کوتاه‌ترین مسیر برای ارسال بسته را می‌یابد.

۸) الگوریتم مسیریابی آگاه از ازدحام می‌تواند از مسیرهای شلوغ در شبکه جلوگیری کند و توانایی تعادل بار ترافیکی و همچنین توان عملیاتی بالاتری نسبت به مسیریابی قطعی معمولی به‌خصوص برای ترافیک‌های با حجم کار سنگین دارد. با این حال این الگوریتم‌ها تحت شرایط خطا، کار نمی‌کنند. برای الگوریتم مسیریابی شبکه بر تراشه، تحمل‌پذیری خطا خیلی مهم است تا قادر به ایجاد مسیریابی مؤثر برای افزایش کارایی سامانه شود [۱۷].

۹) مسیریابی پویای تحمل‌پذیر در برابر خطا، یک الگوریتم مسیریابی با پیکربندی مجدد است که قادر به حذف خطای مسیریابی بعد از مسیریابی است. با این حال، تحمل خطای مسیریاب‌ها (گره‌ها)، منجر به پشتیبانی کانال‌های خطادار نمی‌شود. در مرجع [۱۸] یک الگوریتم مسیریابی تحمل‌پذیر خطای دامنه کوچک برای حمایت از گره‌ها و خطاها پیشنهاد شده است. این الگوریتم چون تعداد لینک‌های خطادار برای هر مسیریاب یکی است، سیاست تحمل خطا را ارائه داده است.

طرح‌های مسیریابی پویای "تشخیص و بازپیکربندی یکپارچه و بی‌طرف در محیط شبکه‌ی قطع‌شده[1]" جداول مسیریابی را برای کمک به تصمیم‌گیری به کار می‌بندد که در آن مسیریاب‌های مجاور به سایر مسیریاب‌ها، درباره لینک خطادار یا روترها اطلاع می‌دهند و جداول مسیریابی را به کمک شکست‌های شناسایی‌شده به‌روزرسانی می‌کند. طرح مسیریابی تحمل‌پذیر خطای گرادیان، شبکه بر تراشه را در نواحی مختلف مدل می‌کند. پس جهت‌های مسیریابی طبق مکانی که در آن گره مقصد وجود دارد، بنا شده است. یک الگوریتم مسیریابی تطبیقی تحمل‌پذیر خطا می‌تواند به‌منظور کنارگذاشتن لینک‌های خطادار، بسته را از طریق گره میانی ارسال کند [۱۸]. در اینجا، موقعیت نسبی منبع، مقصد و گره‌های میانی محدود شده‌اند. این الگوریتم نمی‌تواند با الگوهای خطای پیچیده، درست رفتار کند و نتایج پیاده‌سازی سخت‌افزاری آن وجود ندارد.

دو الگوریتم مسیریابی تحمل‌پذیر خطا شامل FTDR[2] و FTDR-F[3] برای ذخیره فاصله گره‌های مقصد و منبع، از جداول مسیریابی استفاده کرده‌اند. زمانی که وضعیت‌های لینک تغییرمی‌کند، جدول مسیریابی به‌روزرسانی می‌شود. سپس گره جاری می‌تواند یک مسیر بدون خطا را برای ارسال بسته‌ها انتخاب کند. طبق جدول مسیریابی FTDR یک محیط مؤثر وجود ندارد که FTDR به‌منظور کاهش حجم جدول مسیریابی از یک ساختار سلسله‌مراتبی استفاده کرده باشد. تمام سامانه شبکه بر تراشه به چند منطقه تقسیم شده است و یک جدول مسیریابی جداگانه در هر منطقه استفاده شده است. این سامانه دارای محدودیت‌های کلیدی است؛ لذا لینک‌های خطادار باید دو طرفه خاموش شوند و باید دو منطقه متفاوت به هم متصل باشند. برای سامانه سه‌بعدی شبکه بر تراشه، یک الگوریتم مسیریابی تحمل‌پذیر خطا پیشنهاد شده است. LAFT[4] وضعیت خطا را از گره‌های همسایه دریافت می‌کند

[1] UDIREC & ARIADNE = Unified Diagnosis and Reconfiguration & Agnostic Reconfiguration in a Disconnected Network

[2] Fault-Tolerant Deflection Routing

[3] Hierarchical FTDR

[4] Look-Ahead-Fault-Tolerant

و یک مسیر را بر اساس این اطلاعات انتخاب می‌کند. اگر چندین مسیر وجود داشته باشد، مسیر با حداقل فاصله و بیشترین تنوع انتخاب می‌شود. چالش اصلی تمام این رویکردها این است که متأسفانه یک سازوکار کنترل ازدحام کارآمد برای مسیریابی بهینه به‌منظور حفظ عملکرد سیستم تحت بارهای ترافیک سنگین، ارائه نمی‌دهند [۱۹].

۲-۱- شبه‌کد الگوریتم مسیریابی تطبیقی

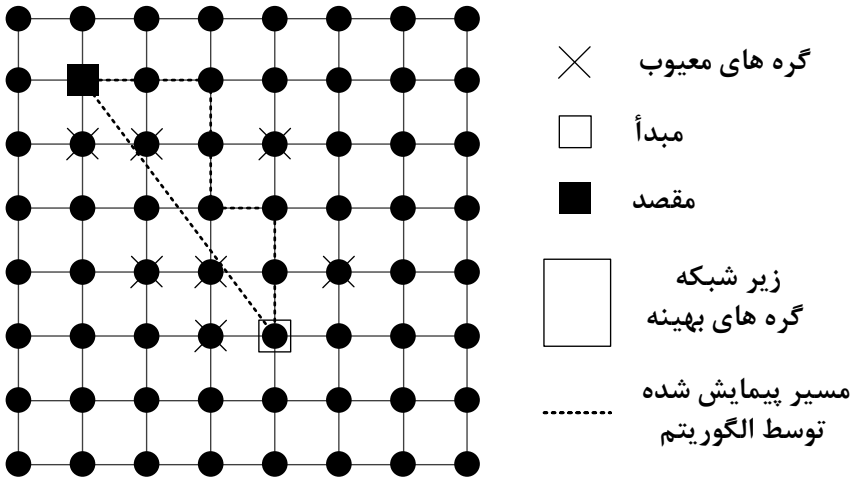
مانند اکثر الگوریتم‌های تحمل‌پذیر اشکال ایستا، در این مقاله نیز فرض اولیه بر متمرکز بودن اطلاعات اشکالات شبکه است؛ بنابراین، در مرحله مقدماتی لازم است تا اطلاعات مربوط به شبکه در تمامی گره‌های آن وجود داشته باشد.

- مرحله ۱: مبدأ گره‌های واقع در مسیر بهینه میان خود و مقصد را شناسایی کرده و در ادامه، وجود اشکال در این گره‌ها را وارسی می‌کند [۶-۴]. (در اینجا منظور از مبدأ گره‌ای است که در حال حاضر با توجه به آدرس مقصد، قصد مسیریابی دارد و لزوماً به معنای مبدأ تولید پیام نیست).
  - اگر در مسیر بهینه اشکالی وجود نداشته باشد، این بسته‌ها به شکل کاملاً تطبیقی و برمبنای الگوریتم دوآتو[1] در طول مسیر به‌پیش رانده می‌شوند.
  - اگر در مسیر بهینه اشکال یا اشکالاتی وجود داشته باشد، به مرحلهٔ ۲ می‌رود.
- مرحله ۲: شرط وجود یک مسیر بهینه بررسی می‌شود. بدین معنی که آیا زیرشبکه گره‌های بهینه برای رساندن پیام از مبدأ به مقصد اتصال دارد یا خیر؟
  - اگر مسیری پیدا شد به مرحله ۳ وارد می‌شود.
  - اگر مسیری پیدا نشد به مرحله ۴ وارد می‌شود.
- مرحله ۳: مبدأ، مربع حاصل از زیرشبکه گره‌های بهینه را به دو بخش تقسیم می‌کند. این تقسیم‌بندی با ترسیم قطر مربع که در دو سر آن مبدأ و مقصد قرار گرفته‌اند انجام می‌شود. برای هر مثلث ایجاد شده، تعداد گره‌های معیوب شمرده می‌شوند. تابع هدف این الگوریتم به دنبال گزینش مثلثی با تعداد کمینه از گره‌های معیوب است. چنانچه تعداد اشکالات در دو مثلث مساوی باشد، یکی از آن‌ها به شکل تصادفی انتخاب می‌شود. البته ممکن است گره ورودی به مثلث مورد نظر دارای اشکال باشد که در این صورت مثلث دیگری جهت مسیردهی انتخاب می‌شود. لازم به یادآوری است، حالتی که در آن هر دو گرهٔ ورودی معیوب باشند، وجود ندارد؛ زیرا شرط وجود مسیر بهینه در مرحله ۲ بررسی شده است و پاسخ آن مثبت بوده است.
- مرحله ۴: این مرحله برای انحراف از مسیر بهینه مورداستفاده قرار می‌گیرد. این حالت در شرایطی رخ خواهد داد که مسیر بهینه بین گره مبدأ و مقصد وجود نداشته باشد. البته این بدان معنا نیست که الگوریتم مثلث مسیر بهینه را حتماً تشخیص خواهد داد، بلکه ممکن است در حرکت‌های پیشین، پیام به‌سوی گرهٔ نامناسبی هدایت شده باشد.

لازم به ذکر است که این مراحل برای هر گره در طول مسیر بررسی می‌شوند. البته اگر در مرحله اول ثابت شد که می‌توان از مسیریابی تطبیقی استفاده کرد، دیگر لازم نیست مراحل بررسی برای گره‌های بعدی در طول مسیر انجام شوند.

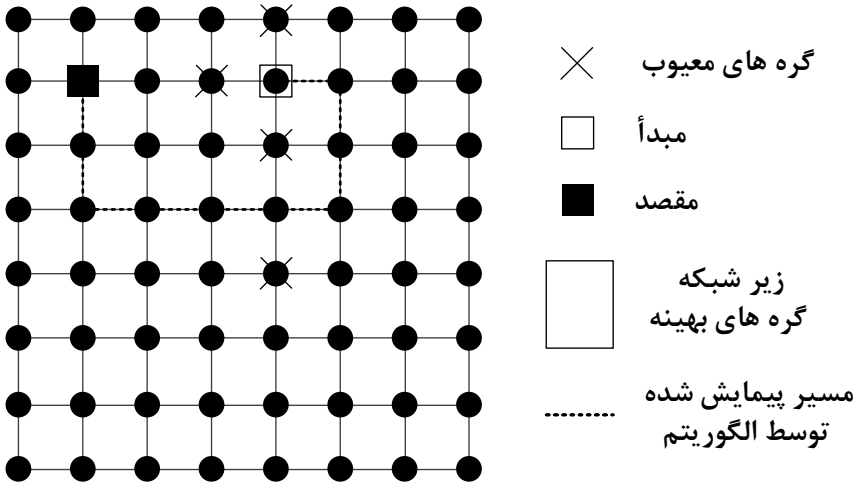
پرسش بعدی این است که الگوریتم مثلث، کانال‌های مجازی را چگونه اختصاص می‌دهد؟ بایستی اذعان داشت که مانند الگوریتم دوآتو، یک کانال مجازی به‌عنوان کانال تطبیقی درنظر گرفته می‌شود و سه کانال دیگر نیز به‌عنوان کانال‌های فرار محسوب خواهند شد. برای پیشگیری از بن‌بست، الگوریتم دوآتو از یک کانال فرار بر طبق روش مسیریابی مبتنی بر بُعد استفاده می‌کند. بدین صورت که در جهت محور X اولویت بالاتری فرض می‌شود؛ بنابراین یکی از کانال‌ها بر اساس شیوهٔ مسیریابی ابتدا در جهت غرب است. بر اساس این مسیریابی، بسته‌های پیام، اجازه‌ی استفاده از چرخش‌های منتهی به‌سوی چپ را ندارند؛ لذا، از یک کانال برای بسته‌هایی که این چرخش‌ها را انتخاب می‌کنند استفاده می‌شود. شکل ۱، مثالی از الگوریتم مثلث را به تصویر کشیده است. در این حالت، الگوریتم نیازی به ورود به قسمت انحراف از مسیر بهینه را ندارد و همان‌طور که دیده می‌شود، الگوریتم تنها مسیر بهینه را یافته است [۲۰]. در شکل ۲ نیز، روش کار الگوریتم مسیریابی مبتنی بر جهت و نیز نحوهٔ انحراف آن از مسیر اصلی نشان داده شده است.

[1] D'Hondt Algorithm



شکل ۱: عملکرد مسیریابی توسط الگوریتم مثلث[۲۰]

Figure 1: Routing performance using the Triangle Algorithm [20].



شکل ۲: عملکرد مسیریابی توسط الگوریتم مبتنی بر جهت [۲۰]

Figure 2: Routing performance using the Direction-Based Algorithm [20].

۳- معرفی الگوریتم پیشنهادی

در این قسمت، با الهام از الگوریتم‌های معرفی شده در بالا، به معرفی یک الگوریتم تطبیقی برای مسیریابی پیغام‌ها در شبکه بر تراشه NOC پرداخته می‌شود. از آنجا که می‌خواهیم ضمن رسیدن به سرعت بالاتر، سردرگمی در الگوریتم اتفاق نیفتد، ماهیت نیمه تطبیقی در نظر گرفته شده است. در واقع این الگوریتم، مشابه الگوریتم‌های بیان‌شده با تغییر در الگوریتم X-Y سعی در بالا بردن سرعت و کاهش تأخیر دارد. الگوریتم پیشنهادی برای مسیریابی بسته‌ها در هم‌بندی توری و توری مدور[1] مناسب است. شبه‌کد مربوط به این الگوریتم در شکل ۳ آورده شده است. همان‌طور که در شبه کد مشاهده می‌شود، این الگوریتم برای مسیریابی، بسته‌ها را به دو دسته تقسیم می‌کند و طبق آن، برخی از بسته‌ها را به صورت معین و طبق الگوریتم X-Y و سایر بسته‌ها را به‌صورت پویا مسیریابی می‌کند. روش کار به این صورت است که اگر Y_s بزرگ‌تر از Y_d باشد، مطابق الگوریتم X-Y بسته‌ها را مسیریابی می‌کند، در غیر این صورت، به صورت پویا، بسته‌ها را در جهات شرق، غرب و یا جنوب (غیر از شمال) مسیریابی می‌کند تا بسته به مقصد برسد. در واقع این الگوریتم مشابه بسیاری از الگوریتم‌های نیمه‌تطبیقی، برای جلوگیری از بن‌بست، از حرکت بسته‌ها در شبکه، در جهاتی که آن‌ها را از مقصد دور می‌کنند، جلوگیری می‌کند [۱۰،۹]. لازم بذکر است که برای شبیه‌سازی الگوریتم‌های مسیریابی ذکرشده و همچنین محاسبه میزان تأخیر انتقال، از نرم‌افزار متلب استفاده شده است. لازم بذکر است که

[1] Mesh and Round Mesh

مدل ترافیکی یکنواخت، مدلی است که در آن ترافیک شبکه در تمام نقاط یکسان فرض شده است، به عبارت دیگر در این مدل، احتمال این‌که مقصد یک بسته، یک گره خاص باشد، با سایر گره‌ها برابر است. در جدول ۱ ۱ شبه‌کد مربوط به الگوریتم تطبیقی ارائه‌شده قابل رؤیت است.

جدول ۱: شبه‌کد مربوط به الگوریتم تطبیقی ارائه‌شده
Table 1: Pseudocode for the proposed adaptive algorithm.

```
Message M is currently in its source at (Xs, Ys) and the
destination is (Xd, Yd).
if (Xs, Ys) = (Xd, Yd) then
    give the message to the local node and return;
else if (Ys>Yd or Ys=Yd) then XY routing
   go in X-dimension while Xs != Xd;
if (Ys != Yd) then
   go in Y-dimension while Ys != Yd and return
    else
      return;
      end if;
else   adaptive routing
go West or East or South while (Xs, Ys) = (Xd,Yd) and
return;
end if;
```

۴- نتایج شبیه‌سازی شبکه پیشنهادی

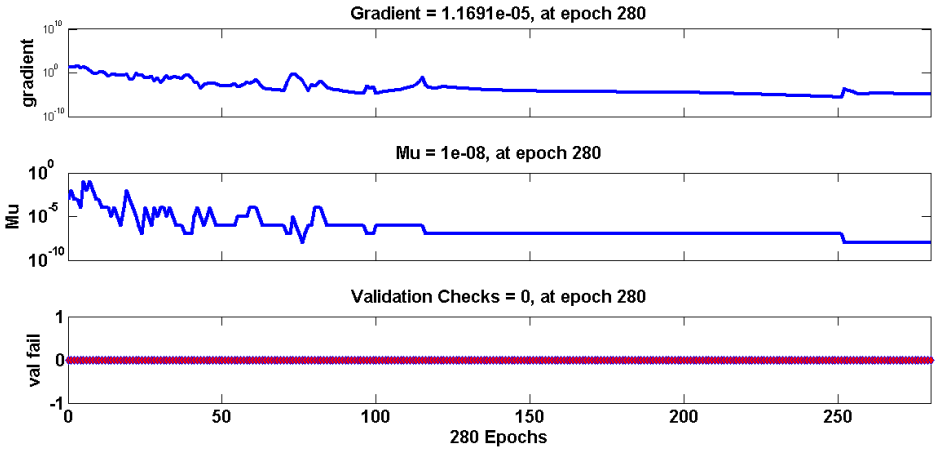
اندازهٔ شبکه مورد آزمون ۸*۸ فرض شده و حداکثر خرابی ۸۰ درصد در نظر گرفته شده است. ضمناً، از پیام‌های ۳۲ بخشی بهره برده است. تعداد کانال‌های مجازی در هر کانال فیزیکی برابر ۴ و عمق بافر به میزان دو برابر طول پیام مقداردهی شده است. فرکانس ساعت برابر ۲۰۰ مگاهرتز، طول هر لینک ۱ میلی‌متر و مقدار پتانسیل برابر ۱ ولت فرض شده است. در شبیه‌سازی از الگوی ترافیک یکنواخت استفاده شده است؛ یعنی هر پردازنده، یک پیام را با احتمال یکسانی برای سایرین ارسال می‌کند. پیام‌های تولید شده در فواصل زمانی، از یک توزیع نمایی انتخاب می‌شوند و پردازنده‌ها پیام‌ها را در یک شکل ناهمگام مسیردهی می‌کنند. همچنین فرض شده است که خرابی‌های غیرعمدی، الگوهای خرابی ایستا هستند و وقوع آن‌ها شبکه را منفصل نمی‌سازد. اِشکالات نشان داده شده در جدول ۲ مورد آزمایش قرار گرفته‌اند. لازم به ذکر است که در صورت عدم حضور گره‌های معیوب، مسیریابی تطبیقی طبق پروتکل دوآتو صورت خواهد پذیرفت.

جدول ۲: مختصات ترکیبات مختلف برای ارزیابی روش پیشنهادی
Table 1: Coordinates of various combinations for evaluating the proposed method.

الگوی اشغال	مختصات نقاط خرابی
U-Shape	(۲،۲)، (۲،۳)، (۲،۴)، (۳،۴)، (۴،۴)، (۴،۲)، (۴،۳)، (۴،۴)
L-Shape	(۲،۱)، (۲،۲)، (۲،۳)، (۲،۴)، (۳،۴)، (۴،۴)، (۵،۴)
H-Shape	(۲،۲)، (۲،۳)، (۲،۴)، (۳،۴)، (۴،۴)، (۵،۴)
T-Shape	(۲،۴)، (۳،۴)، (۴۴،۴)، (۳،۴)، (۴،۴)، (۵،۴)
±Shape	(۳،۱)، (۴،۱)، (۴،۲)، (۴،۳)، (۴،۴)
Random	(۲،۱)، (۲،۴)، (۵،۴)، (۱،۵)، (۴،۵)، (۶،۶)، (۵،۳)، (۵،۲)

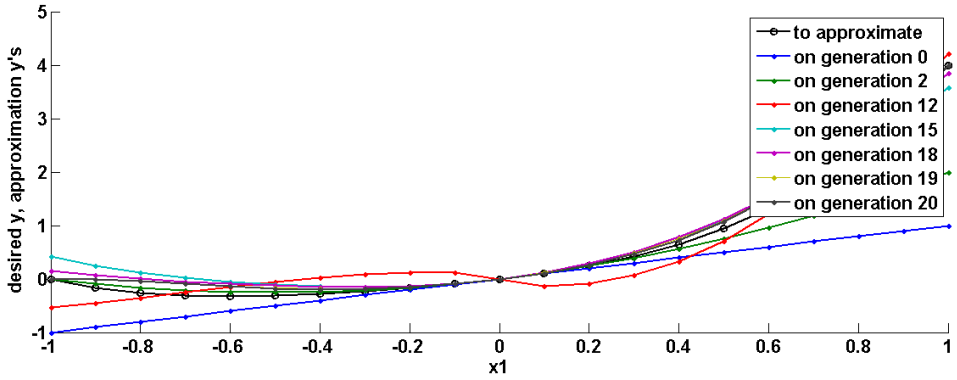
نتایج شبیه‌سازی بر اساس متوسط تأخیر پیام‌ها و متوسط توان مصرفی شبکه بیان شده‌اند. این نتایج در قالب هر دو الگوی کوژ و کاو در شکل‌های ۴ و ۵ بررسی شده است. طبق شکل ۴، برای روش پیشنهادی، گرادیان یا بیشترین شیب تغییرات را برابر با

$۱/۱۶۹ \times ۱۰^{-۵}$ و میانگین مورد انتظار[1] را برابر ۱×۱۰^{-۸} و اعتبارسنجی[2] برابر صفر را به ازای epotch برابر با ۲۸۰ در تأخیر پیام نشان می‌دهد. تغییر بسیار جزئی تأخیر پیام[3] در ارزیابی روش پیشنهادی، به‌ازای حالت تقریبی و نتایج حاصل از روش‌های مختلف تولید (در دو حالت تقریبی و مطلوب) در شکل ۵، نشانگر قابل قبول بودن روش پیشنهادی است.



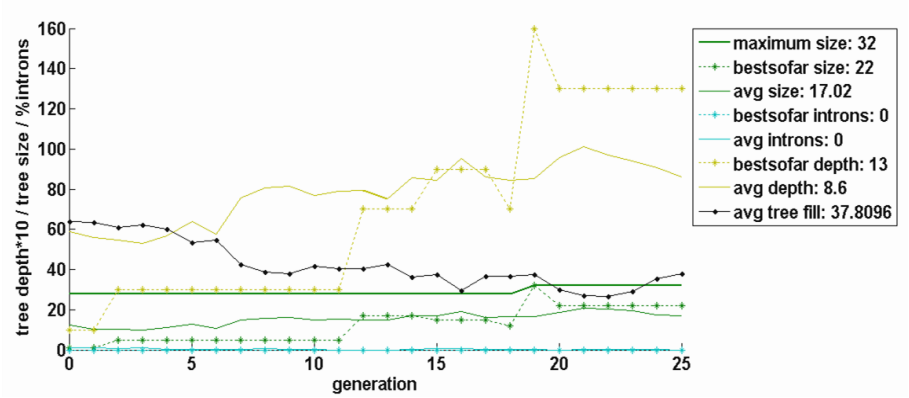
شکل ۴: مقدار تأخیر پیام در ارزیابی روش پیشنهادی

Figure 4: Message latency values in the evaluation of the proposed method.



شکل ۵: تغییر تأخیر پیام در ارزیابی روش پیشنهادی حاصل از روش‌های مختلف

Figure 5: Variation of message latency in the evaluation of the proposed method using different techniques.



شکل ۶: تغییرات انرژی مصرف شده در ارزیابی روش پیشنهادی حاصل از روش‌های مختلف

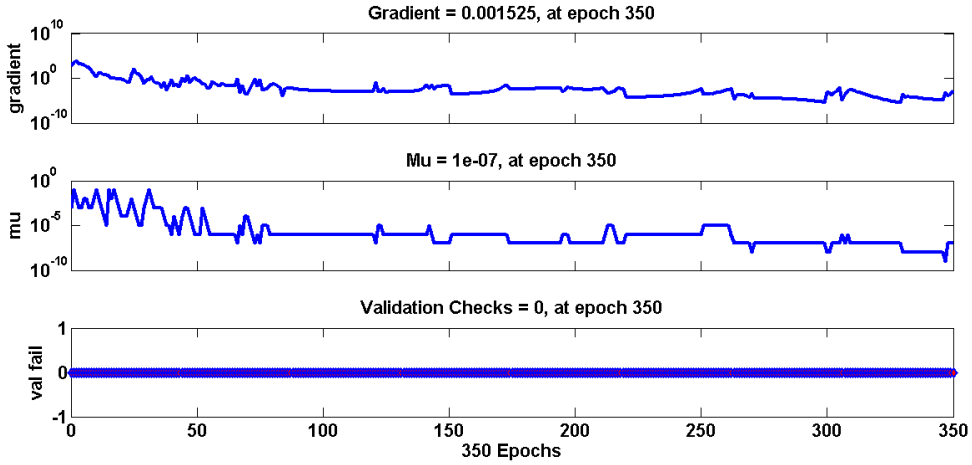
Figure 6: Changes in the consumed energy in the evaluation of the proposed method using different techniques.

[1] population mean or expected value (μ)

[2] Validation Check

[3] message latency

شکل ۷، برای روش پیشنهادی، در مقدار انرژی مصرف شده، وجود گرادیان یا بیشترین شیب تغییرات برابر با $۱/۵۲۷ \times ۱۰^{-۳}$ و میانگین مورد انتظار برابر ۱×۱۰^{-۸} و اعتبارسنجی برابر صفر را به‌ازای epotch برابر با ۳۵۰ نشان می‌دهد. این نتایج، بیانگر قابل قبول بودن نتایج، نسبت به روش‌های مرسوم در سایر مراجع ازنظر مصرف انرژی است.



شکل ۷: مقدار انرژی مصرف شده در ارزیابی روش پیشنهادی

Figure 7: Amount of consumed energy in the evaluation of the proposed method

۵- نتیجه‌گیری

در این مقاله، یک الگوریتم مسیریابی تحمل‌پذیر اشکال ایستا در شبکه‌های میان ارتباطی با هم‌بندی توری و در حضور الگوهای اشکال کوژ و کاو طراحی و شبیه‌سازی شده است. الگوریتم پیشنهادی می‌تواند از الگوهای مختلف اشکال ایستا حمایت کند. نوآوری روش ارائه شده آن است که می‌تواند با تعداد معقولی از اشکالات بدون نیاز به از کار انداختن گره‌های سالم تعامل کند و همچنان کارآیی بالایی را با استفاده از مسیریابی تطبیقی و تنها با ۴ کانال مجازی فراهم سازد و بدین ترتیب هزینهٔ شبکه را نیز کماکان در حالت کمینه حفظ کند، هرچند احتمالا سربار سامانه افزایش می‌یابد. در راستای ادامهٔ کار فعلی، ارائه الگوریتم‌های مسیریابی تحمل‌پذیر اشکال پویا می‌تواند در زمره‌ی کارهای قابل‌توجه تلقی شود، به نحوی که منجر به کاهش ضریب شایستگی (شامل حاصل‌ضرب تاخیر، انرژی مصرفی و سربار سامانه) شود.

مراجع

[1] M. R. Hemmati, M. Dolatshahi and A. Mehrbod, "Increasing the efficiency of NOC routing algorithms based on fault tolerance measurement method," *International Young Engineers Forum (YEF-ECE)*, Costa da Caparica, Portugal, 2018, pp. 31-38, doi: 10.1109/YEF-ECE.2018.8368935.

[2] A. Rezaei and S. M.A. Zanjani, "Design and Analysis of 2 Memristor-Based Nonvolatile SRAMCells," *Journal of Novel Researches on Electrical Power*, vol. 9, no. 2, pp. 47-56, 2020, dor: 20.1001.1. 23222468.1399.9.2.6.6 (in Persian).

[3] S. M. A. Zanjani and M. Parvizi, "Design and Simulation of a Bulk Driven Operational Trans-Conductance Amplifier Based on CNTFET Technology," *Journal of Intelligent Procedures in Electrical Technology*, vol. 12, no. 45, pp. 63-74, 2021, dor: 20.1001.1.23223871.1400.12.1.5.1 (in Persian).

[4] L. Benini and G. deMicheli, "Networks-on-Chip: A New Paradigm for System on Chip Design," *Design Automation and Test in Europe (DATE'02)*, vol. 35, no. 1, pp. 70-78, 2015, doi: 10.1109/DATE.2002.998307.

[5] A. B. Gabis and M. Koudil, "NoC routing protocols – objective-based classification," *Journal of Systems Architecture*, vol. 66–67, pp. 14-32, 2016, doi: 10.1016/j.sysarc.2016.04.011.

[6] S. Raja, J. Logeshwaran, S. Venkatasubramanian, M. Jayalakshmi, N. Rajeswari, N. G. Olaiya and W. D. Mammo, "OCHSA: designing energy-efficient lifetime-aware leisure degree adaptive routing protocol with optimal cluster head selection for 5G communication network disaster management," *Scientific Programming*,vol. 2022, Article ID : 5424356, 2022, doi: 10.1155/2022/5424356.

[7] F. Fazli, M. Mansubbassiri and F. Babazadeh, "A-RPL: Routing Algorithm with the Ability to Support Mobility in Internet of Things Networks," vol. 13, no. 50, pp. 11-32, doi: 10.30495/jce.2023.1975641.1183 (in Persian).

[8] S. Zarmehi, M. Daneshvar Farzanegan and A. Avokh, "A New Algorithm for Link Scheduling in MIMO Wireless Mesh Networks with Various Interference Condition by Ant Colony Algorithm," *Journal of Intelligent Procedures in Electrical Technology* , vol. 15, no. 58, pp. 31-44, 2024, dor: 20.1001.1.23223871.1403.15.58.3.4 (in Persian).

[9] B. S. Heera, Y. N. Singh and A. Sharma, "Congestion-Aware Dynamic RMCSA Algorithm for Spatially Multiplexed Elastic Optical Networks," *International Conference on Optical Network Design and Modeling (ONDM)*, Coimbra, Portugal, 2023, pp. 1-6.

[10] J. Zhang and E. Yeh, "Congestion-aware routing and content placement in elastic cache networks." *arXiv*, vol. 2303.01648, 2023.

[11] J. Oladipo, M. C. du Plessis and T. Gibbon, "Congestion aware ant colony optimisation algorithm for routing and spectrum assignment in flexi-grid optical burst switching networks." *Photonic Network Communications*, vol. 45, no. 2, pp. 67-78, 2023, doi: 10.1007/s11107-023-00993-3.

[12] C. Marcon, T. Webber and A. A. Susin, "Models of computation for NoC mapping: Timing and energy saving awareness," *Microelectronics Journal*, vol. 60, pp. 129-143, 2017, doi: 10.1016/j.mejo.2016.09.005.

[13] C.-H. Huang, C.-Y. Wang and P.-A. Hsiung, "Elastic superposition task mapping for NoC-based reconfigurable systems," *Microprocessors and Microsystems*, vol. 51, pp. 297-312, 2017, doi: 10.1016/j.micpro.2016.12.002.

[14] J. Sepulveda, D. Flórez, V. Immler, G. Gogniat and G. Sigl, "Efficient security zones implementation through hierarchical group key management at NoC-based MPSoCs," *Microprocessors and Microsystems*, vol. 50, pp. 164-174, 2017, doi:10.1016/j.micpro.2017.03.002.

[15] S. Wamakulasuriya and T. M. Pinkston, "Characterization of Deadlocks in Interconnection Networks," in *Proc. of the international Conference on Parallel Processing*, 2015, pp. 80-86, doi:10.1109/IPPS.1997.580852.

[16] Ge-Ming Chiu, "The odd-even turn model for adaptive routing," in *IEEE Transactions on Parallel and Distributed Systems*, vol. 11, no. 7, pp. 729-738, July 2000, doi: 10.1109/71.877831.

[17] J. Wu, "A fault-tolerant and deadlock-free routing protocol in 2D meshes based on odd-even turn model," in *IEEE Transactions on Computers*, vol. 52, no. 9, pp. 1154-1169, Sept. 2003, doi: 10.1109/TC.2003.1228511.

[18] J. Wu and Z. Jiang, "On Constructing the Minimum Orthogonal Convex Polygon for the Fault-Tolerant Routing in 2-D Faulty Meshesl," *IEEE Trans. on Reliability*, vol. 54, no. 3, pp. 449-458, 2015. doi: 10.1109/TR.2005.853039.

[19] M. R. Casu and P. Giaccone, "Power-performance assessment of different DVFS control policies in NoCs," *Journal of Parallel and Distributed Computing*, vol. 109, pp. 193-207, 2017, doi: 10.1016/j.jpdc.2017.06.004.

[20] R. Bishnoi, "Hybrid fault tolerant routing algorithm in NoC," *Perspectives in Science*, vol. 8, pp. 586-588, 2016, doi: 10.1016/j.pisc.2016.06.028.

COPYRIGHTS
©2024 by the authors. Published by the Islamic Azad University Bushehr Branch. This article is an open-access article distributed under the terms and conditions of the Creative Commons Attribution 4.0 International (CC BY 4.0) https://creativecommons.org/licenses/by/4.0