مجله کنترل
ISSN (print) 2008-8345
ISSN (online) 2538-3752
جلد۱۵، شماره ۱، بهار ۱۴۰۰، صفحه ۱۲۵-۱۱۳

یک الگوریتم مسیریابی چندپخشی با مدیریت بار بر اساس منطق فازی با قابلیت اطمینان بالا برای شبکه‌های روی تراشه با همبندی مش دوبعدی و سه‌بعدی

محمد علائی[۱]، فهیمه یزدان‌پناه[۲]

[۱] استادیار، دانشکده فنی و مهندسی، گروه مهندسی کامپیوتر، دانشگاه ولی‌عصر (عج) رفسنجان، alaeim@vru.ac.ir

[۲] استادیار، دانشکده فنی و مهندسی، گروه مهندسی کامپیوتر، دانشگاه ولی‌عصر (عج) رفسنجان، yazdanpanahf@vru.ac.ir

دریافت: ۱۳۹۸/۰۲/۲۷ ویرایش: ۱۳۹۸/۱۲/۱۲ پذیرش: ۱۳۹۹/۰۳/۱۶

چکیده: امروزه، در سیستم‌های دیجیتال، تعداد زیادی واحدهای پردازشی بر روی یک تراشه قرار می‌گیرند. سیستم‌های دیجیتال روی تراشه، برای دستیابی به کارایی مطلوب، به زیرساخت‌های ارتباطی مقیاس‌پذیر و کارآمد نیاز دارند. شبکه روی تراشه راه‌حلی مناسب با کارایی بالا برای مواجهه با بسیاری از مشکلات ارتباطی روی تراشه، مانند پیچیدگی‌های سیم‌بندی و تجمیع تعداد زیاد ترانزیستورها در یک تراشه می‌باشد. در معماری‌های شبکه روی تراشه، پروتکل‌های ارتباطی، الگوریتم مسیریابی و همبندی نقش مهمی در عملکرد کلی سیستم ایفا می‌کنند. در این مقاله، یک الگوریتم مسیریابی تطبیقی چندپخشی برای شبکه‌های روی تراشه دوبعدی و سه‌بعدی مبتنی بر همبندی مش با مدیریت بار بر اساس منطق فازی ارائه می‌شود. در این الگوریتم، با توجه به تولید و توزیع غیریکسان بار در شبکه، سیستم فازی به صورت پویا، از ایجاد قفل‌زنده و بن‌بست جلوگیری می‌کند که این امر منجر به مدیریت کارآمدتر ازدحام و افزایش کارایی می‌شود. نتایج ارزیابی‌ها نشان می‌دهند که روش پیشنهادی در مقایسه با الگوریتم‌های مسیریابی که اخیراً برای ارتباطات چندپخشی پیشنهاد شده‌اند، سرعت، بهره‌وری و قابلیت اطمینان بالاتری در شبکه‌های دوبعدی و سه‌بعدی با همبندی مش ارائه می‌دهد.

کلمات کلیدی: شبکه روی تراشه، مسیریابی چندپخشی، کنترل بار با سیستم فازی، قابلیت اطمینان بالا.

A High Reliable Multicast Routing Algorithm for 2D and 3D Mesh-based NoCs with Fuzzy-based Load Control

Mohammad Alaei, Fahimeh Yazdanpanah

Abstract: Nowadays, the technology of digital systems is moving towards increasing the number of processing elements on a chip, which requires scalable and efficient communication infrastructure to achieve higher performance. Network-on-chip (NoC) is a high-performance solution for dealing with many on-chip communication challenges, such as the wiring complexity and the integration of a large number of transistors on a chip. In NoC, communication protocols, routing algorithms and topologies play important roles in the overall system performance. In this paper, a multicast adaptive routing algorithm with fuzzy-based load control for mesh-based NoCs is proposed. This algorithm, due to the non-uniform production and distribution of unicast and multicast packets, prevents dead-locks and live-locks dynamically by the fuzzy control system. The proposed algorithm leads to efficient congestion management, latency reduction and improvement in network throughput and reliability, and even reduction in power consumption. The results of evaluations and comparison with recent multicast routing algorithms demonstrate that the proposed algorithm provides higher reliability and better performance for both 2D and 3D NoCs with mesh topology, than the other works.

Keywords: Network-on-chip, Multicast routing, Fuzzy-based load controller, High reliability.

[Downloaded from joc-isice.ir on 2026-11-12]
[DOR: 20.1001.1.20088345.1400.15.1.4.9]
[DOI: 10.52547/joc.15.1.113]

۱- مقدمه

سیستم‌های روی تراشه[۱] بزرگ و پیچیده، نیاز به یک ساختار ارتباطی منتظم، مقیاس‌پذیر و قابل‌پیکربندی با کارآیی بالا دارند که این نیاز توسط زیرساخت‌هایی مانند گذرگاه مشترک و ارتباطات نقطه‌به‌نقطه تأمین نمی‌شود. شبکه روی تراشه[۲] به‌عنوان راهکاری کارآمد برای زیرساخت ارتباطی سیستم‌های روی تراشه پیچیده با مجتمع‌سازی بالا ارائه شده است که منظم، مقیاس‌پذیر و قابل تعمیم با مصرف توان پایین می‌باشد. از سوی دیگر، ترکیب پشته‌سازی سه‌بعدی[۳] و شبکه روی تراشه که با عنوان شبکه روی تراشه سه‌بعدی شناخته می‌شود، مزایای متعددی از جمله کاهش تأخیر انتشاری، کاهش مساحت تراشه و همچنین افزایش پهنای باند را به همراه دارد. برای طراحی یک شبکه روی تراشه کارآمد، مسائلی نظیر همبندی، الگوریتم مسیریابی، میزان هوشمندی واحد کنترل در شرایط ترافیکی مختلف و همچنین میزان مصرف انرژی بایستی مدنظر قرار داد [۱-۶].

کارایی شبکه‌های روی تراشه به‌طور گسترده‌ای به الگوریتم‌های مسیریابی آنها وابسته است. الگوریتم‌های مسیریابی برای تعیین بهترین مسیر معیارهای مختلفی مانند تأخیر، طول مسیر، پهنای باند، میزان ازدحام[۴]، قابلیت اطمینان، و حتی مصرف توان را در نظر می‌گیرند. طراحی یک الگوریتم مناسب و ساده، تأخیر و مصرف توان را کاهش می‌دهد، چرا که سادگی الگوریتم مسیریابی، سادگی ساختار مسیریاب شبکه روی تراشه را در پی دارد و این امر سربار سخت‌افزاری را به طور قابل ملاحظه‌ای کاهش می‌دهد. الگوریتم‌های مسیریابی شبکه روی تراشه می‌توانند به‌صورت قطعی و یا به‌صورت تطبیقی باشند. پیاده‌سازی الگوریتم‌های قطعی ساده است، اما از آنجا که به ترافیک لحظه‌ای شبکه توجه ندارند، برای شبکه روی تراشه‌های بزرگ کارآمد نیستند. الگوریتم‌های مسیریابی تطبیقی انعطاف‌پذیری بالاتری نسبت به الگوریتم‌های قطعی دارند و کارآیی بالاتری ارائه می‌دهند. الگوریتم‌های مسیریابی تطبیقی می‌توانند آگاه به ازدحام یا بی‌توجه به ازدحام باشند [۱-۱۰]. در الگوریتم‌های بی‌توجه به ازدحام، تصمیم‌های مسیریابی بدون در نظر گرفتن بار شبکه اتخاذ می‌شود. این رویکرد ممکن است باعث ایجاد اختلال در مسیریابی و عدم توزیع متوازن بار در شبکه شود. در الگوریتم‌های مسیریابی آگاه به ازدحام، مسیری که از مبدأ تا مقصد طی می‌شود با توجه به وضعیت شبکه و بر اساس اطلاعات محلی و یا اطلاعات سراسری شبکه تعیین می‌شود. در الگوریتم‌هایی که فقط اطلاعات محلی در نظر گرفته می‌شود، مسیریابی فقط بر اساس وضعیت ازدحام همسایه‌های مجاور انجام می‌شود. در صورتی که الگوریتم‌های مسیریابی که بر اساس اطلاعات سراسری شبکه تصمیم می‌گیرند، با در نظر گرفتن شرایط ترافیک و ازدحام کل شبکه، توزیع بهتری از بار شبکه را ارائه می‌دهند.

شرایط ازدحام شبکه می‌تواند به صورت فازی و پویا با توجه به ترافیک لحظه‌ای شبکه و معیارهای مختلفی مانند تعداد بافرهای خالی، تعداد کانال‌های مجازی[۵] در دسترس، تعداد درخواست‌ها به سوئیچ تقاطعی[۶] در هر مسیریاب مورد بررسی قرار گیرد [۱۱-۱۴].

ارتباطات در شبکه روی تراشه می‌تواند به‌صورت پیام‌های تک‌پخشی[۷] و یا چندپخشی[۸] باشد. در ارتباطات تک‌پخشی، یک بسته از یک مسیریاب مبدأ به یک مسیریاب مقصد فرستاده می‌شود، درحالی‌که در ارتباطات چندپخشی، یک بسته از یک منبع به چند مقصد فرستاده می‌شود. الگوریتم‌های مسیریابی متعددی برای ارتباطات تک‌پخشی و چندپخشی در سیستم‌های روی تراشه چندپردازنده‌ای ارائه شده است [۱۵-۶,۲۹-۹]. اگرچه در برنامه‌های کاربردی مبتنی بر شبکه روی تراشه، تعداد بسته‌های چندپخشی کمتر از بسته‌های تک‌پخشی می‌باشد، اما ارتباطات چندپخشی، به دلیل حجم ترافیک زیادی که به شبکه تحمیل می‌کنند، بر کارآیی و عملکرد کلی سیستم تأثیر زیادی می‌گذارند [۱۵-۲۱]. الگوریتم‌های مسیریابی تک‌پخشی برای هدایت بسته‌های چندپخشی مناسب نیستند، چون موجب افزایش ترافیک، ازدحام و بن‌بست در شبکه روی تراشه می‌شوند. برای پیاده‌سازی بسیاری از برنامه‌های کاربردی متداول، ارائه یک الگوریتم کارآمد که تحویل به موقع و کامل بسته‌های چندپخشی به مقصد را با کمترین سربار فراهم کند، ضروری به نظر می‌رسد.

در این مقاله، یک الگوریتم مسیریابی برای شبکه‌های روی تراشه دوبعدی و سه‌بعدی مبتنی بر همبندی مش با کنترل بار بر اساس منطق فازی پیشنهاد می‌شود. الگوریتم مسیریابی پیشنهادی، هم برای ارسال بسته‌های تک‌پخشی و هم برای ارسال بسته‌های چندپخشی کارآمد است و با در نظر گرفتن همه مسیرهای ممکن، بر اساس ترافیک لحظه‌ای شبکه و شرایط ازدحام، از تطبیق‌پذیری بسیار بالایی برخوردار است. سیستم فازی از داده‌های کنترلی مسیریاب‌های همسایه برای تعیین هزینه هر پیوند و اتخاذ تصمیم در مورد پیوند بعدی استفاده می‌کند. در روش پیشنهادی، اگر پیوندی بر اساس خروجی سیستم فازی هزینه بسیار بالایی داشته باشد، موقتاً مسدود می‌شود. با کاهش سطح ولتاژ منبع تغذیه در مسیر مسدود، در مصرف توان صرفه‌جویی می‌کنیم. این راهکار پیشنهادی، علاوه بر حذف قفل‌های زنده[۹] و سردرگمی در مسیر، موجب افزایش قابلیت اطمینان و حفظ بسته‌ها با جایگزین کردن مسیر مناسب در هنگام بروز بن‌بست[۱۰] و خطا، بدون استفاده از کانال مجازی، می‌شود. ساختار الگوریتم پیشنهادی به صورت توزیع شده در سطح شبکه عمل می‌کند و نیاز به واحد کنترل مرکزی ندارد. بنابراین، به راحتی قابل گسترش و قابل تعمیم برای شبکه‌های بزرگ با تعداد هسته زیاد می‌باشد. سربار سخت‌افزاری روش پیشنهادی، به دلیل سادگی ساختار سیستم فازی و پهنای باند کم مورد نیاز داده‌های کنترلی، و از همه مهمتر حذف کانال-های مجازی بسیار کم است. نتایج ارزیابی‌ها نشان می‌دهد که الگوریتم

[Downloaded from joc-isice.ir on 2026-11-12]
[DOR: 20.1001.1.20088345.1400.15.1.4.9]
[DOI: 10.52547/joc.15.1.113]

مسیریابی پیشنهادی در مقایسه با الگوریتم‌های مشابه، موجب افزایش قابل‌توجه بهره‌وری و سرعت با کمترین تعداد بسته‌های گم شده و نیز کاهش مصرف توان می‌شود.

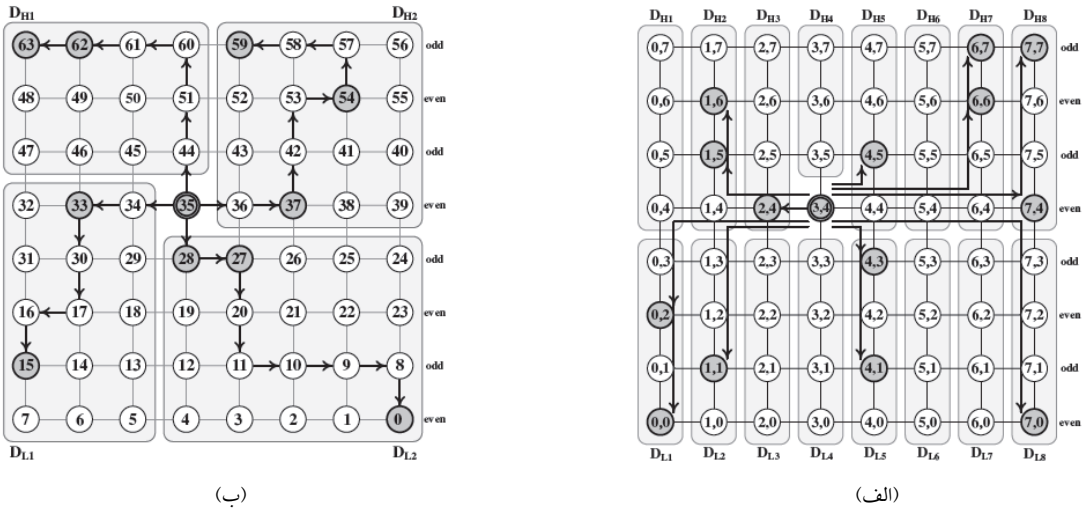
ادامه این مقاله به این صورت ساماندهی شده است: در بخش دوم، پیشینه تحقیق مرور می‌شود. جزئیات الگوریتم مسیریابی پیشنهادی در بخش سوم توصیف می‌شوند. در بخش چهارم، نتایج ارزیابی و مقایسه الگوریتم پیشنهادی با الگوریتم‌های مشابه ارائه می‌شود. در نهایت، در بخش پنجم نتیجه‌گیری انجام می‌شود.

۲- پیشینه تحقیق

به طور کلی، برای ارسال بسته‌های چندپخشی سه روش مبتنی بر تک‌پخشی[۱۱]، مبتنی بر درخت[۱۲] و مبتنی بر مسیر[۱۳] ارائه شده است [۱۶]. در روش مبتنی بر تک‌پخشی،گره مبدأ چندین نسخه جداگانه از بسته را تولید می‌کند و به مقصدهای مختلف ارسال می‌نماید که این عمل منجر به افزایش ترافیک و ادحام و کاهش قابلیت اطمینان سیستم و در نتیجه کاهش بهره‌وری و کارآیی سیستم خواهد شد. به همین دلیل، این روش در شبکه‌های واقعی به ندرت استفاده می‌شود. در روش مبتنی بر درخت [۲۵]، مسیرهای چندپخشی بر اساس الگوریتم درخت پوشای کمینه[۱۴] ساخته می‌شود که ریشه آن گره مبدأ و فرزندان درخت مقصدهای ارتباط چندپخشی می‌باشند. هر بسته به سمت یک یا چند کانال خروجی ارسال می‌شود تا شاخه‌های درخت شکل گیرند و بدین ترتیب به تمامی گره‌های مقصد دست یابند. در این روش، اگر یکی از شاخه‌های درخت مسدود شود، کل درخت مسدود می‌گردد. انسداد درخت، باعث اشغال ماندن چندین کانال ارتباطی برای چندین سیکل زمانی و افزایش رقابت در سطح شبکه برای دستیابی به کانال‌های ارتباطی می‌شود، در نتیجه ازدحام در سطح شبکه افزایش می‌یابد. از این رو، الگوریتم‌های مسیریابی مبتنی بر درخت برای نرخ ترافیک بالا در شبکه مناسب نمی‌باشند.

در روش‌های مبتنی بر مسیر، ارسال هر بسته از مبدأ به مقصدها از طریق مسیرهای از پیش تعیین شده مانند مسیرهای همیلتونی [۸,۷] صورت می‌گیرد. در این روش، آدرس‌های مقصدها در سرآیند هر بسته قرار می‌گیرند و بسته‌ها در طول مسیر به مقصدها تحویل داده می‌شوند. در روش‌های مبتنی بر مسیر، تعداد نسخه‌های تولیدی از بسته کم است که این امر موجب کاهش ترافیک و ازدحام در شبکه می‌شود. اما تأخیر این روش‌ها بالاست. یک راهکار برای حل این مسأله، بخش‌بندی[۱۵] همبندی شبکه روی تراشه و تولید بسته برای هر بخش می‌باشد.

در ادامه، تعدادی از الگوریتم‌های مبتنی بر مسیر و بر پایه بخش‌بندی که هم از چندپخشی و هم تک‌پخشی پشتیبانی می‌کنند، معرفی می‌شوند [۹]. یکی از این روش‌ها، مسیریابی چندپخشی ستونی[۱۶] (CP) می‌باشد. در این روش بسته‌های چندپخشی به دو برابر تعداد ستون‌های شبکه‌ی مش، تقسیم و ارسال می‌شوند (شکل ۱-الف). در واقع، به ازای هر ستون دو بسته، یکی برای مقصدهای موجود در بالای مبدأ و دیگری برای مقصدهای موجود در پایین مبدأ در هر ستون ایجاد می‌شوند. در نتیجه، هر بسته مسیر کوتاه‌تری طی می‌کند که در شبکه‌های با ترافیک بالا باعث کاهش تأخیر می‌شود. راهکار دیگر، الگوریتم مسیریابی چندبخشی چندمسیره[۱۷] (MP) است. الگوریتم چندمسیره یک روش مسیریابی قطعی و عاری از بن‌بست است که بر اساس مسیرهای همیلتونی کار می‌کند و می‌تواند به‌صورت هم‌زمان برای مسیریابی بسته‌های چندپخشی و تک‌پخشی استفاده شود. یک مثال از این الگوریتم در شکل ۱-ب نشان داده شده است. در مسیریابی چندمسیره بسته‌های تک‌پخشی و بسته‌های چندپخشی با یک روش مسیریابی می‌شوند اما، با توجه به اینکه اکثر بسته‌های موجود در شبکه از نوع تک‌پخشی می‌باشند، کارآیی شبکه با مسیریابی قطعی به نحوه چشمگیری کاهش می‌یابد.



(الف) (ب)

شکل ۱: مثال‌هایی از الگوریتم‌های چندپخشی مبتنی بر مسیر و بر پایه بخش‌بندی [۹]، الف) ستونی، ب) چندمسیره

[Downloaded from joc-isice.ir on 2026-11-12]
[DOR: 20.1001.1.20088345.1400.15.1.4.9]
[DOI: 10.52547/joc.15.1.113]

یک الگوریتم دیگر چندپخشی مبتنی بر مسیر و بر پایه بخش‌بندی، الگوریتم مسیریابی همیلتونی زوج و فرد (HOE) [۹] می‌باشد که سطرها را با توجه به شماره‌ی سطر به زوج و فرد تقسیم می‌کند. سطر اول صفر و زوج، سطر بعدی یک و فرد و بقیه نیز به همین ترتیب می‌باشند. این الگوریتم، با توجه به اینکه بسته در کدام سطر قرار دارد، دو چرخش از چهار چرخش را ممنوع می‌کند. در یک ستون زوج بسته نمی‌تواند از غرب به شمال یا جنوب بچرخد. در یک ستون فرد بسته نمی‌تواند به سمت شرق بچرخد. درصورتی‌که سطر انتخابی بعدی آخرین سطر قابل انتخاب قبل مقصد باشد و آن سطر ازدحام بالایی داشته باشد، دیگر امکان تغییر مسیر موجود نمی‌باشد و باعث افزایش تأخیر بسته می‌شود.

الگوریتم‌های متعددی برای ارتباطات چندپخشی در شبکه روی تراشه سه‌بعدی ارائه شده است [۲۹-۱۸]. در [۱۸] یک الگوریتم مسیریابی چندپخشی با ترکیب روش‌های مبتنی بر درخت و مبتنی بر مسیر ارائه شده است. این روش که HPBM+NB نامیده می‌شود، به این صورت است که بر اساس وضعیت بافرهای مسیریاب‌های مجاور، برای تعیین مسیر یکی از این دو راهکار انتخاب می‌شود. در این روش بدون استفاده از کانال‌های مجازی بن‌بست حذف می‌شود و بار در شبکه متوازن می‌شود. در مقاله [۲۳] روش‌های بخش‌بندی و مسیریابی چندپخشی مبتنی بر مسیر برای یک شبکه روی تراشه سه‌بعدی به منظور پیاده‌سازی پروتکل‌های پیوستگی حافظه نهان ترکیب شده است. یک مسیریاب برای ارتباطات چندپخشی با قابلیت اطمینان بالا در [۲۴] ارائه شده است.

روش ارائه شده در [۲۷] با بخش‌بندی شبکه به چهار بخش شمالی، جنوبی، شرقی و غربی با توجه به گره مبدأ تلاش در ارسال بسته‌های چندپخشی دارد. در صورت وجود گره یا گره‌های مقصد در راستای شرقی و غربی و همچنین در راستای شمالی و جنوبی یک کپی از بسته ارسال می‌شود. مسیریاب‌های میانی در صورت نیاز، از همین بسته‌ها استفاده می‌کنند و ممکن است نسخه‌برداری در گره‌هایی به‌جز گره‌های مبدأ انجام گیرد. نویسندگان در [۲۸] با توجه به موقعیت گره مبدأ، شبکه به هشت بخش شمالی، شمال شرقی، شرقی، جنوب شرقی، جنوبی، جنوب غربی، غربی و شمال غربی بخش‌بندی می‌کنند. گره مبدأ به یکی از گره‌های مقصد در هر بخش کپی ارسال می‌نماید. سپس با استفاده از مسیر همیلتون، نسخه‌های تولید شده به تمامی مقصدها تحویل داده می‌شود. در [۳۰، ۲۹] راهکارهایی برای بهبود مصرف انرژی در شبکه روی تراشه سه‌بعدی با ارتباطات چندپخشی پیشنهاد شده است. روش ارائه شده در [۳۰] (3D-POM)، یک الگوریتم چندپخشی ترکیبی مبتنی بر درخت و مسیر است و بر پایه بخش‌بندی همبندی کار می‌کند.

۳- الگوریتم مسیریابی پیشنهادی

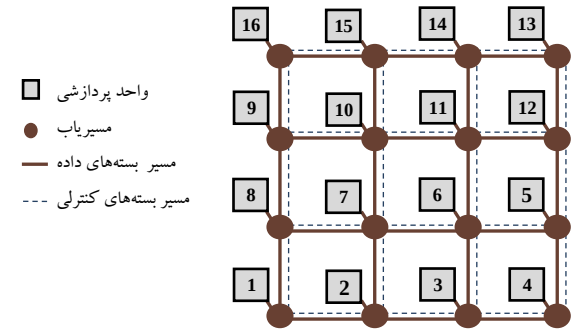
در این بخش، الگوریتم مسیریابی پیشنهادی که MARFA [18] نامیده می‌شود، تشریح می‌شود. الگوریتم MARFA، با در نظر گرفتن همه مسیرهای ممکن به صورت توزیع شده، بر اساس ترافیک لحظه‌ای شبکه و شرایط ازدحام، از تطبیق‌پذیری بسیار بالایی برخوردار است. تطبیق‌پذیری یکی از عوامل مهم در مسیریابی می‌باشد که موجب افزایش کارایی می‌شود. کنترل بار شبکه بر اساس سیستم فازی انجام می‌شود که از داده‌های کنترلی برای تعیین هزینه هر پیوند و اتخاذ تصمیم در مورد مسیر انتخابی استفاده می‌کند. در MARFA، مسیر بسته‌های کنترلی از مسیر بسته‌های داده مجزا است. از این رو، بسته‌های کنترلی حاوی داده‌های ورودی سیستم فازی موجب معطّلی بسته‌های داده و افزایش تأخیر و ازدحام نمی‌شوند. سربار سخت‌افزاری روش پیشنهادی، به دلیل سادگی ساختار سیستم فازی و پهنای باند کم مورد نیاز داده‌های کنترلی، بسیار کم است.

ایده اصلی MARFA، افزایش تطبیق‌پذیری مسیریابی‌های چندپخشی مبتنی بر مسیر و بر پایه بخش‌بندی با کمترین سربار می‌باشد که این کار بر اساس سیستم فازی انجام می‌شود که در ادامه تشریح خواهد شد. الگوریتم MARFA به صورت توزیع شده در سطح شبکه اجرا می‌شود و نیاز به واحد کنترل مرکزی ندارد. بنابراین، به راحتی قابل گسترش و قابل تعمیم برای شبکه‌های بزرگ با تعداد واحد پردازشی زیاد است. در MARFA بر اساس سیستم فازی هزینه هر پیوند مشخص می‌شود. پیوندی که کمترین هزینه را داشته باشد، به عنوان مقصد بعدی در نظر گرفته می‌شود. اگر پیوندی هزینه بالایی داشته باشد، به طور موقت مسدود می‌شود و حرکت به سمت آن غیرمجاز می‌شود. مسدود کردن پیوند با هزینه بالا در هر مسیریاب محلی و موقت می‌باشد و نیاز نیست هر مسیریاب از پیوند مسدود شده مسیریاب دیگر اطلاع داشته باشد. این روش موجب حذف قفل‌های زنده و سردرگمی در مسیر، افزایش قابلیت اطمینان و حفظ بسته‌ها با جایگزین کردن مسیر مناسب در هنگام بروز بن‌بست و خطا می‌شود. علاوه بر این، به منظور کاهش مصرف انرژی، سطح ولتاژ منبع تغذیه پیوندهای مسدود کاهش داده می‌شود.

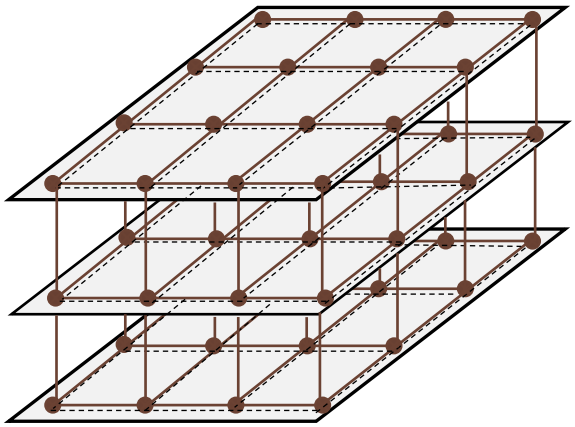
همانطور که شکل ۲ نشان می‌دهد، در MARFA، برای بسته‌های کنترلی پیوندهایی مستقل از پیوندهای مختص بسته‌های داده در نظرگرفته شده است. در MARFA بسته‌های کنترلی در هر سطح به مسیریاب‌های مجاور ارسال می‌شوند و نشان می‌دهند که درگاه انتهای کدام پیوند نزدیک به اشباع می‌باشد و باید از ارسال بسته به آن پیوند جلوگیری شود.

در روش پیشنهادی، هر مسیریاب باید بر بافرهای ورودی خود نظارت کند تا اطلاعات درست و دقیق بر اساس شرایط ترافیک شبکه در اختیار سیستم فازی مسیریاب‌های مجاور قرار دهد. برای اطلاع‌رسانی شرایط ترافیکی و ازدحام، امکان تولید بسته‌های کنترلی زیادی وجود دارد.

[Downloaded from joc-isice.ir on 2026-11-12]
[DOR: 20.1001.1.20088345.1400.15.1.4.9]
[DOI: 10.52547/joc.15.1.113]



(الف)

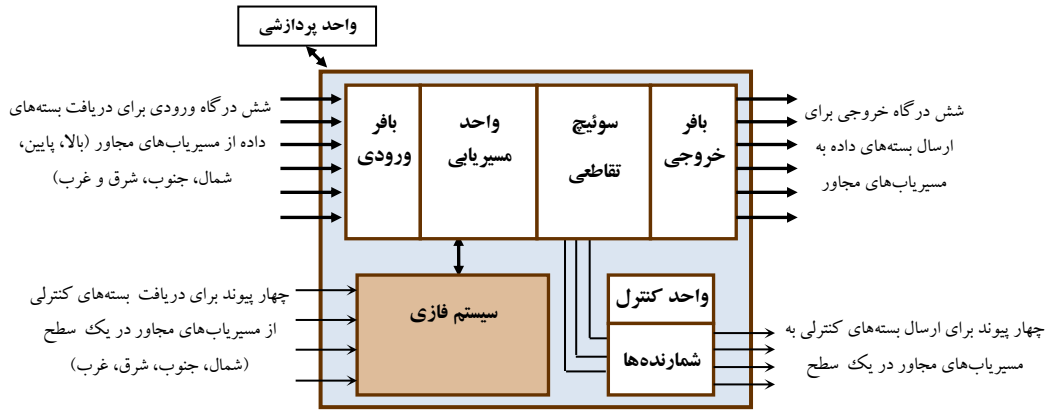


(ب)

شکل ۲: شبکه‌های روی تراشه با مسیرهای مستقل داده و کنترل برای پیاده‌سازی MARFA، الف) شبکه دوبعدی، ب) شبکه سه‌بعدی

در شبکه روی تراشه مبتنی بر MARFA، به منظور کاهش تعداد بسته‌های کنترلی و در نتیجه، کاهش سربار بسته‌های کنترلی، سیاست‌های مختلفی اعمال شده است. هر مسیریاب، سه نوع شمارنده برای شمارش تعداد فلیت‌های ذخیره شده در بافر هر درگاه ورودی، تعداد سیکل تأخیر (معطّلی) فلیت در بافر ورودی و تعداد درخواست‌ها به سوئیچ تقاطعی دارد. در هر مورد، بسته‌های کنترلی فقط در صورتی تولید و ارسال می‌شوند که تعداد فلیت‌ها در بافر درگاه ورودی، تعداد درخواست‌ها به سوئیچ تقاطعی و تعداد سیکل‌ها تأخیر از حد آستانه مشخص شده بیشتر باشد. در واقع، فقط در صورت وجود ازدحام در یک مسیریاب، بسته کنترلی تولید می‌شود. علاوه بر آن، در فاصله‌های زمانی مشخص، شمارنده تعداد فلیت‌های هر بافر و نیز شمارنده تعداد درخواست‌های سوئیچ تقاطعی، مقدار فعلی خود را با مقدار قبلی خود مقایسه می‌کنند، اگر مقادیر متفاوت بودند، مسیریاب آنها را به صورت بسته‌های کنترلی به سیستم فازی مسیریاب منتهی به آن درگاه ارسال می‌کند.

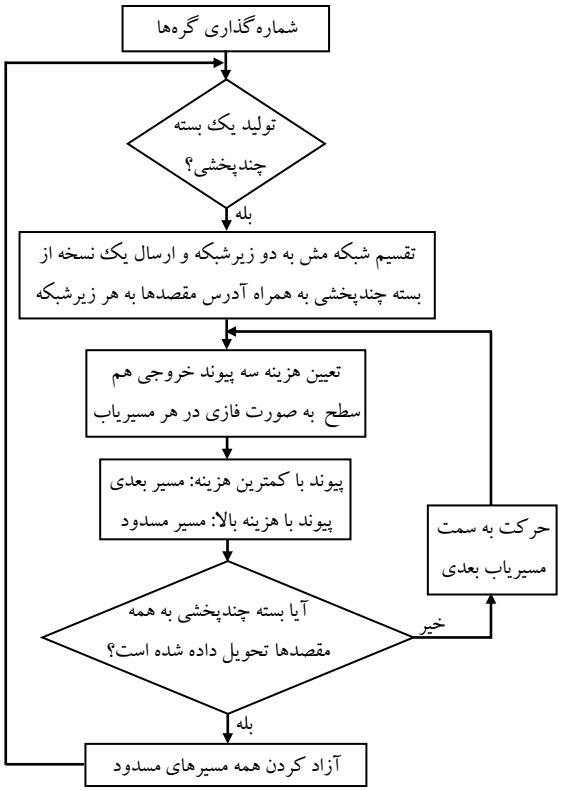
در شکل ۳، ساختار یک مسیریاب شبکه روی تراشه سه‌بعدی برای پیاده‌سازی الگوریتم MARFA نشان داده شده است که شامل بافرهای ورودی و خروجی، واحد مسیریابی، سوئیچ تقاطعی، سیستم فازی، واحد کنترل و شمارنده‌ها می‌باشد. همانطور که شکل نشان می‌دهد، هر مسیریاب شامل شش درگاه ورودی و شش درگاه خروجی برای تبادل بسته‌های داده با مسیریاب‌های مجاور (بالا، پایین، شمال، جنوب، شرق و غرب) و یک درگاه ورودی/خروجی محلی برای ارتباط با واحد پردازشی می‌باشد. علاوه بر آن، هر مسیریاب، چهار پیوند ورودی برای دریافت بسته‌های کنترلی از مسیریاب‌های مجاور در یک سطح (شمال، جنوب، شرق، غرب) به منظور استفاده در سیستم فازی و نیز چهار پیوند خروجی برای ارسال بسته‌های کنترلی به چهار مسیریاب‌های مجاور و هم سطح خود دارد. لازم به ذکر است که پیوندهای کنترلی فقط برای ارتباطات هر سطح است. پیوندهای کنترلی در پیوندهای عمودی وجود ندارد زیرا تصمیم‌گیری فازی برای انتخاب پیوند و مسیریاب بعدی در همان سطح است.



شکل ۳: ساختار یک مسیریاب در شبکه روی تراشه سه‌بعدی با الگوریتم مسیریابی MARFA

[Downloaded from joc-isice.ir on 2026-11-12]
[DOR: 20.1001.1.20088345.1400.15.1.4.9]
[DOI: 10.52547/joc.15.1.113]

شکل ۴، فلوچارت MARFA را برای مسیریابی بسته‌های چندپخشی نشان می‌دهد. برای اجرای الگوریتم پیشنهادی، هر گره در ساختار مش دوبعدی همانند شکل ۲-الف شماره‌گذاری می‌شود. در یک شبکه روی تراشه دوبعدی، در صورت تولید یک بسته چندپخشی، گره‌های هر سطح با همبندی مش به دو دسته تقسیم می‌شوند: زیرشبکه بالایی مسیریاب مبدأ با شماره‌های بزرگ‌تر از شماره مبدأ و زیرشبکه پایینی با شماره‌های کمتر از شماره مبدأ. به ازای هر زیر شبکه، یک نسخه از بسته چندپخشی تولید می‌شود و به همراه آدرس مقصدها ارسال می‌شود. هر بسته در حین پیمودن مسیر، وقتی به مسیریابی می‌رسد که شماره مشخصه مسیریاب با شماره اولین گره در لیست سرآیند مقایسه می‌شود. در صورت برابربودن آنها، یک نسخه از بسته به گره مربوطه تحویل داده می‌شود و آدرس گره از لیست حذف می‌شود و بسته به مسیر خود ادامه می‌دهد.



شکل ۴: فلوچارت الگوریتم مسیریابی پیشنهادی (MARFA)

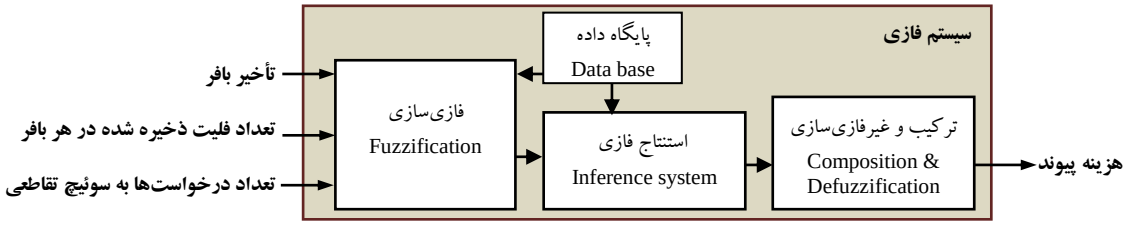
مشابه همین رویه، الگوریتم MARFA برای شبکه روی تراشه سه-بعدی با همبندی مش اجرا می‌شود. به این صورت که به ازای هر سطح، یک نسخه از هر بسته چندپخشی حاوی آدرس مقصدهای موجود در آن سطح تولید و از طریق کانال‌های عمودی ارسال می‌شود. در هر سطح، زیرشبکه‌های بالایی و پایینی تشکیل می‌شوند و دو نسخه از بسته چندپخشی تولید و طبق الگوریتم به مقصدها تحویل داده می‌شوند.

۳-۱ سیستم فازی MARFA

همانطور که مطرح شد، برای افزایش کارآیی MARFA، از یک سیستم فازی برای انتخاب پیوند بعدی و نیز مسدود کردن یکی از سه پیوند خروجی هر مسیریاب در راستای کنترل ازدحام و بار و نیز کاهش مصرف توان استفاده می‌شود. شکل ۵ ساختار سیستم فازی برای الگوریتم MARFA را نشان می‌دهد. این سیستم دارای سه بخش فازی‌سازی، سیستم استنتاج و غیرفازی‌سازی است.

فازی‌سازی از متغیرهای ورودی غیرفازی و بر اساس شهود و تجربه داده‌های فازی را تولید می‌کند. سیستم استنتاج بر اساس قوانین فازی خروجی غیرفازی تولید می‌کند. در روش MARFA تأخیر بافر درگاه ورودی، تعداد فلیت ذخیره شده در بافر هر درگاه ورودی و تعداد درخواست‌ها به سوئیچ تقاطعی به عنوان ورودی‌های غیرفازی از طریق پیوندهای کنترلی از مسیریاب‌های همسایه در اختیار واحد فازی‌سازی قرار می‌گیرد. واحد فازی‌سازی، به پارامترهای تأخیر بافر خروجی و تعداد فلیت ذخیره شده در هر بافر خروجی داده‌های فازی {خیلی کم، کم، متوسط و زیاد} اختصاص می‌دهد. توابع عضویت سیستم فازی MARFA در شکل ۶ نشان داده شده‌اند.

شکل ۶- الف تابع عضویت تعداد فلیت ذخیره شده در بافر خروجی را نشان می‌دهد. هر بافر خروجی صفر تا هشت فلیت می‌تواند نگهداری کند. تعداد فلیت‌های معطّل شده در بافر یک درگاه خروجی، نشان‌دهنده وجود یا عدم وجود ازدحام در مسیریاب بعدی منتهی به این درگاه خروجی است. هر چه تعداد فلیت‌های ذخیره شده در بافر خروجی بیشتر باشد، هزینه آن بیشتر خواهد شد. مقادیر فازی برای تابع عضویت تعداد فلیت طوری تعریف شده‌اند که برای مقادیر "متوسط" و "زیاد" پهنای بیشتری نسبت به مقادیر "کم" و "خیلی کم" در نظر گرفته شود. دلیل آن، تأثیر وجود هر فلیت بر تأخیر و هزینه درگاه ورودی می‌باشد. در واقع، اگر در بافر ورودی حداقل چهار فلیت ذخیره شده باشد، این بافر به شرایط ازدحام بسیار نزدیک است.



شکل ۵: ساختار سیستم فازی MARFA

[Downloaded from joc-isice.ir on 2026-11-12]
[DOR: 20.1001.1.20088345.1400.15.1.4.9]
[DOI: 10.52547/joc.15.1.113]

شکل ۶- ب تابع عضویت تأخیر هر بافر خروجی را نشان می‌دهد که بنا به شرایط ترافیکی هر پیوند، تأخیر را بین صفر تا چهار سیکل تعریف نموده‌ایم. در شرایط ترافیکی عادی، هر فلیت یک یا دو سیکل در بافر معطّل می‌شود که یک سیکل انتظار نیز می‌تواند به آن اضافه شود. بنابراین، اگر تأخیر فلیت در بافر کمتر و مساوی سه سیکل باشد، نشان‌دهنده وجود ازدحام در مسیریاب نیست. از این رو، مقادیر فازی این تابع عضویت طوری تعریف شده‌اند که اگر یک فلیت چهار سیکل در بافر معطّل شد، ازدحام در نظر گرفته شود. اگر بسته‌ای بعد از چهار سیکل انتظار پردازش نشد، طول عمر آن تمام می‌شود و از بافر حذف می‌شود.

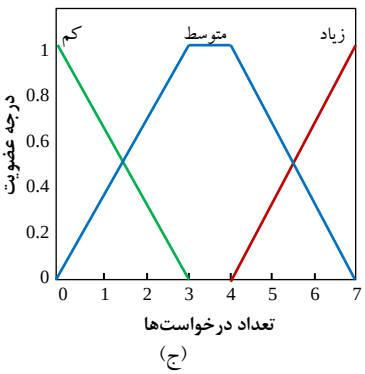
خیلی کم = {۲، ۰، ۰}
کم= {۴، ۲، ۰}
متوسط= {۷، ۵، ۴، ۱}
زیاد= {۸، ۸، ۷، ۵}

(الف)

خیلی کم = {۱، ۰، ۰}
کم= {۳، ۲، ۱، ۰}
متوسط= {۴، ۳، ۱}
زیاد= {۴، ۴، ۳}

(ب)

کم = {۳، ۰، ۰}
متوسط= {۷، ۴، ۳، ۰}
زیاد= {۷، ۷، ۴}



(ج)

شکل ۶: توابع عضویت و مقادیر فازی ورودی‌های سیستم فازی MARFA، الف) تابع عضویت تعداد فلیت ذخیره شده در هر بافر درگاه ورودی، ب) تابع عضویت تأخیر بافر هر درگاه ورودی، ج) تابع عضویت تعداد درخواست‌ها به سوئیچ تقاطعی

مقادیر فازی برای محاسبه هزینه هر درگاه طوری تعریف شده‌اند که تأثیر تعداد فلیت ذخیره‌شده در هر بافر ورودی از تأثیر تأخیر هر فلیت بیشتر باشد. واحد استنتاج بر اساس قوانین جدول ۱، هزینه هر درگاه را مشخص می‌کند.

جدول ۱: قوانین فازی برای محاسبه هزینه هر درگاه بر اساس تعداد فلیت ذخیره شده در هر بافر خروجی و تأخیر بافر خروجی

		تأخیر بافر ورودی			
		خیلی کم	کم	متوسط	زیاد
تعداد فلیت ذخیره شده در بافر ورودی	خیلی کم	خیلی کم	خیلی کم	کم	کم
	کم	خیلی کم	کم	متوسط	متوسط
	متوسط	کم	متوسط	زیاد	زیاد
	زیاد	کم	متوسط	زیاد	زیاد

یکی دیگر از ورودی‌های سیستم فازی، تعداد درخواست‌ها به سوئیچ تقاطعی می‌باشد که برای آن مقادیر فازی {کم، متوسط و زیاد} اختصاص داده شده است. شکل ۶- ج تابع عضویت تعداد درخواست‌ها به سوئیچ تقاطعی را نشان می‌دهد. اگر شبکه روی تراشه دوبعدی باشد، اندازه سوئیچ تقاطعی مسیریاب ۵×۵ است و اگر شبکه روی تراشه سه‌بعدی باشد، مسیریاب‌ها سوئیچ تقاطعی با اندازه ۷×۷ دارند. از این رو، در شکل ۶- ج تعداد درخواست‌ها را بین صفر تا هفت در نظر گرفتیم. برای این تابع عضویت، مقادیر فازی طوری تعریف شده‌اند که مقدار "متوسط" پهنای بیشتری نسبت به مقادیر "کم" و "زیاد" داشته باشد. پردازش کمتر از چهار درخواست همزمان به سوئیچ تقاطعی موجب ازدحام در مسیریاب نخواهد شد. سیستم استنتاج، هزینه هر پیوند را بر اساس هزینه هر درگاه و تعداد درخواست‌ها به سوئیچ تقاطعی طبق جدول ۲ تعیین می‌کند.

جدول ۲: قوانین فازی برای محاسبه هزینه هر پیوند خروجی بر اساس هزینه آن درگاه و تعداد درخواست‌ها به سوئیچ تقاطعی

		هزینه درگاه			
		خیلی کم	کم	متوسط	زیاد
تعداد درخواست‌ها به سوئیچ تقاطعی	کم	کم	کم	متوسط	متوسط
	متوسط	کم	متوسط	زیاد	زیاد
	زیاد	متوسط	متوسط	زیاد	زیاد

همانطور که توضیح داده شد، سیستم فازی و استنتاج در MARFA هر پیوند را در دو مرحله طبق جدول‌های ۱ و ۲ محاسبه می‌کند. این امر موجب کاهش تعداد قوانین فازی و در نتیجه حجم کمتر پایگاه داده مورد نیاز سیستم فازی می‌شود. در این شرایط، ۲۸ قانون در پایگاه داده سیستم فازی هر مسیریاب ذخیره می‌شود. در صورتی که اگر فازی‌سازی و استنتاج در یک مرحله انجام می‌شد، می‌بایست ۴۸ قانون در پایگاه داده

[Downloaded from joc-isice.ir on 2026-11-12]
[DOR: 20.1001.1.20088345.1400.15.1.4.9]
[DOI: 10.52547/joc.15.1.113]

سیستم فازی ذخیره شود. بخش غیرفازی‌سازی، خروجی‌ها را ترکیب می‌کند و داده غیرفازی را به‌عنوان هزینه پیوند ارائه می‌دهد. پیوندی که کمترین هزینه را دارد، به عنوان پیوند بعدی انتخاب می‌شود و پیوندی که هزینه بالایی دارد موقتاً مسدود می‌شود و سطح ولتاژ منبع تغذیه آن به حداقل مقدار رسانده می‌شود.

پیوندهایی که هزینه آنها طبق جدول ۲ در منطق فازی "زیاد" باشد، به طور موقت مسدود و غیرفعال می‌شوند. مسدود کردن پیوند به منظور برقراری توازن بار و کاهش بار ترافیکی در پیوندهای دارای ازدحام، انجام می‌گیرد. غیرفعال نمودن پیوند با کاهش سطح ولتاژ، در راستای کاهش مصرف توان ایستا می‌باشد. به محض برطرف شدن ازدحام پیوند مسدودشده، بسته‌ها به سمت آن پیوند نیز هدایت می‌شوند. اگر یک پیوند با هزینه زیاد، مسدود و غیرفعال نشود، با توجه به ازدحام در آن پیوند، احتمال از دست رفتن بسته‌هایی که به آن پیوند فرستاده می‌شوند، بالا است.

در MARFA همانند الگوریتم‌های چندپخشی همیلتونی [۹,۱۸]، برای درگاه‌های ورودی مسیریاب‌ها کانال‌های مجازی در نظر گرفته نشده است که این امر موجب کاهش قابل‌توجه حجم سخت‌افزار و نیز کاهش مصرف توان هر مسیریاب می‌شود. با این وجود روش پیشنهادی با استفاده از سیستم فازی عاری از بن‌بست است. تعداد درخواست‌ها به یک سوئیچ تقاطعی تعداد درخواست‌های همزمان برای یک درگاه خروجی را نشان می‌دهد که بیانگر میزان ازدحام می‌باشد.

٤- نتایج شبیه‌سازی و ارزیابی الگوریتم پیشنهادی

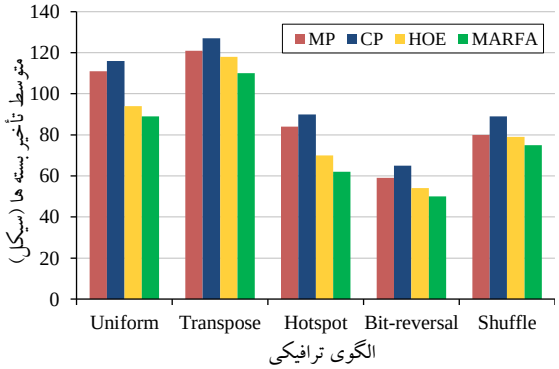
در این بخش، کارآیی الگوریتم پیشنهادی (MARFA) در شبکه‌های روی تراشه دوبعدی و سه‌بعدی با همبندی مش مورد ارزیابی قرار می‌گیرد و با الگوریتم‌های مشابه مقایسه می‌شود. برای ارزیابی‌ها، از شبیه‌ساز شبکه روی تراشه Noxim و ابزار تحلیل مصرف توان Orion2 استفاده شده است.

٤-۱ ارزیابی الگوریتم پیشنهادی در شبکه روی تراشه دوبعدی

در آزمایش اول، کارایی الگوریتم پیشنهادی برای شبکه‌های دوبعدی با الگوریتم‌های چندپخشی همیلتونی زوج و فرد (HOE) [۹]، ستونی (CP) و چندمسیره (MP) از نظر تأخیر، بهره‌وری و مصرف توان تحت الگوهای ترافیکی متفاوت مقایسه شده است. در شبیه‌سازی‌های انجام شده، ۸۰٪ از بسته‌ها به عنوان بسته‌های تک‌پخشی و ۲۰٪ باقی‌مانده به‌عنوان بسته‌های چندپخشی در نظر گرفته شده است. پارامترهای شبیه‌سازی (جدول ۳) و نتایج سه الگوریتم فوق‌الذکر از مقاله [۹] استخراج شده‌اند و روش پیشنهادی با همان پارامترها، شبیه‌سازی شده است. نتایج این آزمایش در شکل‌های ۷ تا ۹ نشان داده شده‌اند. نتایج از ۱۰ بار اجرای مستقل با نرخ‌های تزریق مختلف (در بازه ۰/۰۲ تا ۰/۲ بسته بر سیکل) و میانگین کردن خروجی‌ها، به دست آمده‌اند.

جدول۳: پارامترهای شبیه‌سازی شبکه روی تراشه دوبعدی

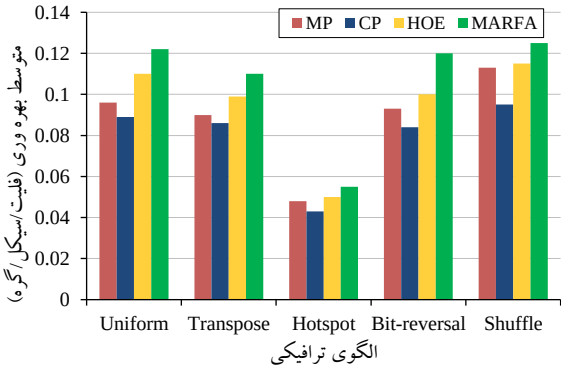
پارامتر	مقدار
همبندی و اندازه‌ی شبکه	مش ۸×۸
اندازه‌ی بافر	۸ فلیت
اندازه‌ی بسته	۱۶ فلیت
اندازه‌ی فلیت	۳۲ بیت
تعداد مقصدهای چندپخشی	۲۵ گره
تعداد سیکل‌های راه‌اندازی اولیه[۱۹] شبیه‌ساز	۱۰۰۰ سیکل
تعداد کل سیکل‌های اجرای شبیه‌ساز	۲۰۰۰۰ سیکل
الگوهای ترافیکی (توزیع بسته‌ها)	Uniform, Transpose, Hotspot, Bit-reversal, Shuffle



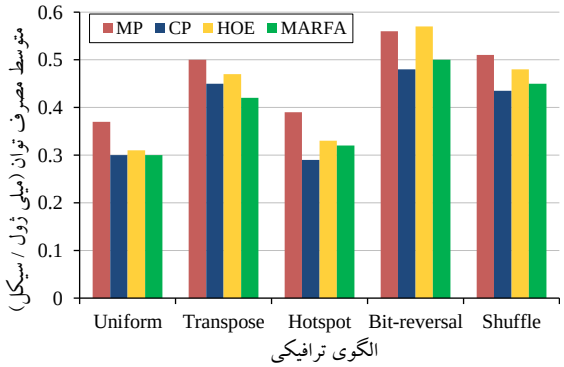
شکل ۷: متوسط تأخیر بسته‌ها تحت الگوهای ترافیکی مختلف

همانطور که شکل ۷ نشان می‌دهد، MARFA تأخیر کمتر و در نتیجه، سرعت بالاتری در مقایسه با سایر الگوریتم‌های مورد مقایسه ارائه می‌دهد. در شکل ۸ متوسط بهره‌وری الگوریتم‌های مورد مقایسه نشان داده شده است. همانطور که شکل نشان می‌دهد، روش پیشنهادی با مدیریت ازدحام به صورت فازی، موجب افزایش چشمگیر بهره‌وری برای الگوهای ترافیکی مختلف می‌شود. در شکل ۹ مصرف توان MARFA را با سه الگوریتم چندپخشی مذکور مقایسه شده است. بکارگیری مسیرهای مجزا برای بسته‌های داده و بسته‌های کنترلی، حذف کانال‌های مجازی و همچنین کاهش سطح ولتاژ منبع تغذیه پیوند مسدود شده، موجب کاهش مصرف توان در MARFA در مقایسه با روش‌های دیگر می‌شود. البته همانطور که شکل ۹ نشان می‌دهد، برای بعضی از الگوهای ترافیکی روش ستونی نسبت به روش پیشنهادی مصرف توان کمتری دارد.

[Downloaded from joc-isice.ir on 2026-11-12]
[DOR: 20.1001.1.20088345.1400.15.1.4.9]
[DOI: 10.52547/joc.15.1.113]

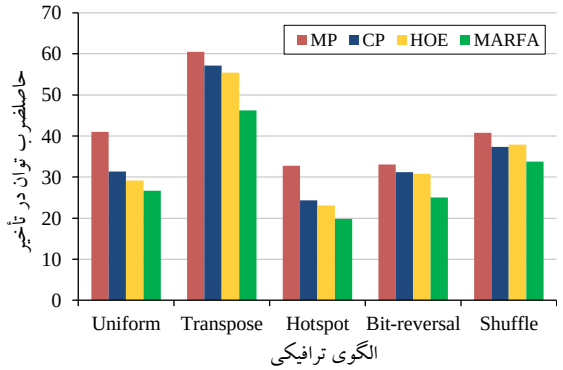


شکل ۸: متوسط بهره‌وری تحت الگوهای ترافیکی مختلف



شکل ۹: متوسط مصرف توان تحت الگوهای ترافیکی مختلف

به منظور نشان دادن کارآمدی MARFA، حاصل‌ضرب توان در تأخیر[۲۰] چهار الگوریتم MARFA، HOE، CP و MP برای الگوهای ترافیکی مختلف در شکل ۱۰ نشان داده شده است. همانطور که شکل نشان می‌دهد حاصل‌ضرب توان در تأخیر الگوریتم MARFA در مقایسه با سه الگوریتم دیگر، کمتر است و درنتیجه، کارآیی روش پیشنهادی بالاتر است.



شکل ۱۰: حاصل‌ضرب توان در تأخیر تحت الگوهای ترافیکی مختلف

در ارزیابی دوم، مصرف توان MARFA با الگوریتم‌های چندپخشی همیلتونی زوج و فرد (HOE) [۹] و HPBM+NB [۱۸] برای یک شبکه روی تراشه دوبعدی مش با ۶۴ گره مقایسه شده است. در این آزمایش تعداد بسته‌های چندپخشی ۳۰٪ در نظر گرفته شده است. همانطور که جدول ۴ نشان می‌دهد MARFA نسبت به هر دو روش مذکور مصرف توان پایین‌تری دارد.

جدول ۴: متوسط مصرف توان بر حسب میلی‌وات در یک شبکه روی تراشه دوبعدی ۸×۸

	۱۰ مقصد چندپخشی با نرخ تزریق ۰/۰٤	۲۰ مقصد چندپخشی با نرخ تزریق ۰/۰۱۲۵
HOE	۱۱/۱۸	۱۱/۱۲
HPBM+NB	۱۰/۳۸	۹/۹۷
MARFA	۱۰/۲۴	۹/۹۴

برای ارزیابی بیشتر، تأخیر MARFA را با چهار الگوریتم مسیریابی چندپخشی HPBM+NB [۱۸]، HAMUM [۸]، APBM [۱۷] و HOE [۹] برای شبکه روی تراشه دوبعدی مقایسه کردیم. هدف از این ارزیابی، مقایسه متوسط تأخیر و بهره‌وری اشباع[۲۱] الگوریتم‌های مورد مقایسه برای ساختار مش ۸×۸ با هشت مقصد چندپخشی می‌باشد. برای این شبیه‌سازی، الگوی ترافیکی یکنواخت و اندازه بافرها ۲۰ فلیت در نظر گرفته شده است. نتایج شبیه‌سازی در جدول ۵ ارائه شده‌اند.

جدول ۵: متوسط تأخیر و بهره‌وری اشباع

	متوسط تأخیر (سیکل)	بهره‌وری اشباع (بسته/سیکل/گره)
HAMUM	۶۷	۰/۰۳
HOE	۶۷	۰/۰۳۵
APBM	۷۹	۰/۰۴۵
HPBM+NB	۶۷	۰/۰۸
MARFA	۶۸	۰/۱۰۵

۴-۲ ارزیابی الگوریتم پیشنهادی در شبکه روی تراشه سه‌بعدی

MARFA از لحاظ تأخیر با الگوریتم‌های Hamfa [۱۹] و ARP [۲۳] برای شبکه روی تراشه سه‌بعدی تحت الگوهای ترافیکی یکنواخت[۲۲] و نقطه کانونی[۲۳] مقایسه شده است. در این ارزیابی، پارامترهای شبیه‌سازی بر اساس پارامترهای ارائه شده در [۲۳] تنظیم شده‌اند (جدول ۶). ۳۰٪ از ۸۰ هزار بسته چندپخشی و بقیه تک‌پخشی هستند.

ترافیک یکنواخت یکی از ساده‌ترین الگوهای ترافیکی می‌باشد که در آن احتمال ارسال یک بسته از یک گره به هر گره‌ی دیگر یکسان می‌باشد. در این تابع احتمال ایجاد نقاط ازدحام کاملاً تصادفی می‌باشد و شانس هر نقطه برای ایجاد ازدحام برابر با نقاط دیگر می‌باشد. در ترافیک نقطه کانونی، تعدادی نقطه‌ی حساس در همبندی در نظر گرفته می‌شود

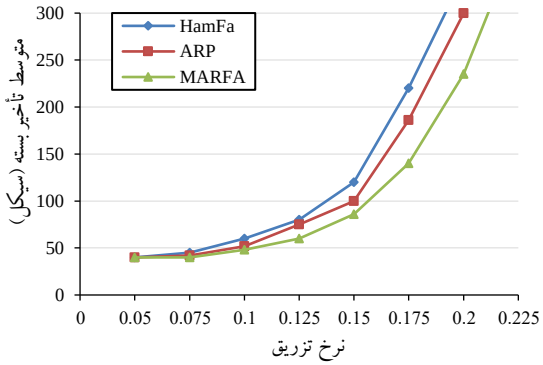
[Downloaded from joc-isice.ir on 2026-11-12]
[DOR: 20.1001.1.20088345.1400.15.1.4.9]
[DOI: 10.52547/joc.15.1.113]

که در این نقاط احتمال دریافت بسته بیشتر از سایر نقاط می‌باشد. در شبیه‌سازی‌های این آزمایش چهار نقطه‌ی کانونی در مرکز هر سطح با توزیع احتمال ۲۵٪ در نظر گرفته شده است.

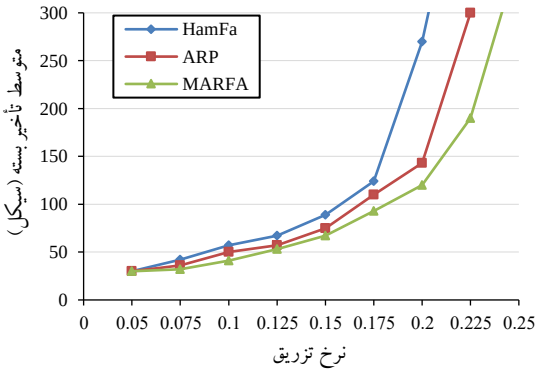
جدول ۶: پارامترهای شبیه‌سازی شبکه روی تراشه سه‌بعدی

پارامتر	مقدار
اندازه‌ی شبکه	۴×۴×۳ (۴۸ گره)
اندازه‌ی بافر	۸ فلیت
اندازه‌ی بسته	۵ فلیت۱۶ بیتی
حداکثر تعداد مقصدهای چندپخشی	۸ گره
تعداد سیکل‌های راه‌اندازی اولیه شبیه‌ساز	۲۰۰۰۰ سیکل
تعداد کل سیکل‌های اجرای شبیه‌ساز	۸۰۰۰۰ سیکل

همانطور که شکل ۱۱ نشان می‌دهد، MARFA برای هر دو الگوی ترافیکی نسبت به الگوریتم‌های ARP و HamFa تأخیر کمتری دارد.



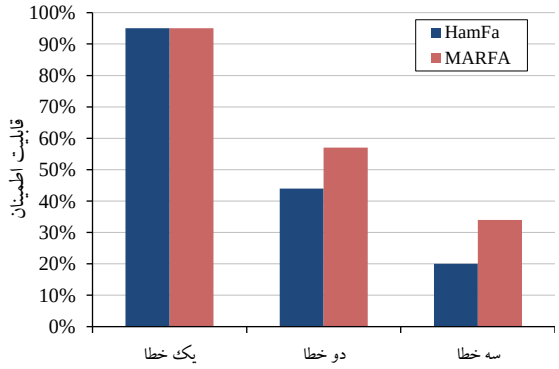
(الف)



(ب)

شکل ۱۱: متوسط تأخیر در یک شبکه روی تراشه سه‌بعدی با الگوریتم‌های HamFa، ARP و MARFA، الف) تحت الگوی ترافیکی یکنواخت، ب) تحت الگوی ترافیکی نقطه کانونی

در ادامه، MARFA از لحاظ قابلیت اطمینان با الگوریتم مسیریابی HamFa مقایسه شده است. HamFa یک الگوریتم مسیریابی مبتنی بر مسیرهای همیلتونی با قابلیت اطمینان و تحمل‌پذیری بالا برای ارتباطات تک‌پخشی و چندپخشی در شبکه روی تراشه‌های دوبعدی و سه‌بعدی است. یک شبکه را در صورتی کاملا مطمئن می‌گویند که اگر تمام بسته‌های تولید شده به مقصد نهایی برسند، حتی در شرایطی که شبکه دچار ازدحام و یا خطا در پیوندها شده باشد. نتایج شبیه‌سازی نشان می‌دهد که HamFa با وجود یک، دو و سه خطا (پیوند قطع) قابلیت اطمینان به ترتیب ۹۵٪، ۴۴٪ و ۲۰٪ دارد. با در نظر گرفتن شرایط یکسان، قابلیت اطمینان MARFA برای یک خطا ۹۵٪، برای دو خطا ۵۷٪ و برای سه خطا ۳۴٪ است (شکل ۱۲). این اعداد بر اساس متوسط تعداد بسته‌های دریافتی نسبت تعداد کل بسته‌های ارسالی در شرایط ترافیکی مختلف حاصل از شبیه‌سازی طبق پارامترهای جدول ۳ به دست آمده‌اند. همانطور که شکل ۱۲ نشان می‌دهد، MARFA به دلیل استفاده از سیستم فازی، قابلیت اطمینان بیشتری نسبت به HamFa، به ویژه برای تعداد بیشتر خطا دارد.



شکل ۱۲: قابلیت اطمینان الگوریتم‌های HamFa و MARFA

میزان مصرف انرژی MARFA با دو الگوریتم چندپخشی دیگر (MXYZ [۲۹] و 3D-POM [۳۰]) برای دو شبکه سه‌بعدی با اندازه مختلف و تعداد مختلف مقصدهای چندپخشی مقایسه شده است. در این تحلیل، اندازه بافرها چهار فلیت در نظر گرفته شده است. جدول‌های ۷ و ۸ نتایج این آزمایش را نشان می‌دهند. همانطور که مشاهده می‌شود، برای شبکه بزرگتر و تعداد مقصدهای بالاتر، MARFA مصرف توان کمتری نسبت به دو روش دیگر دارد. اما برای بسته‌های چندپخشی با تعداد مقصدهای کمتر از ۲۰ در شبکه ۴×۴×۳ ، الگوریتم 3D-POM مصرف توان پایین‌تری نسبت به روش پیشنهادی دارد.

جدول ۷: متوسط انرژی مصرفی بر حسب نانوژول یک شبکه روی تراشه سه‌بعدی با ۴×۴×۳ گره

	درصد مقصدهای چندپخشی				
	۱۰-۰	۲۰-۱۰	۳۰-۲۰	۴۰-۳۰	۵۰-۴۰
MXYZ	۱/۸	۱/۵۳	۱/۴۵	۱/۳۷	۱/۳
3D-POM	۱/۷۲	۱/۴۷	۱/۴	۱/۳۲	۱/۲۶
MARFA	۱/۷۵	۱/۴۹	۱/۳۶	۱/۲۷	۱/۲۱

[Downloaded from joc-isice.ir on 2026-11-12]
[DOR: 20.1001.1.20088345.1400.15.1.4.9]
[DOI: 10.52547/joc.15.1.113]

جدول ۸: متوسط انرژی مصرفی بر حسب نانوژول یک شبکه روی تراشه سه‌بعدی با ۸×۸×۳ گره

	درصد مقصدهای چندپخشی				
	۱۰-۰	۲۰-۱۰	۳۰-۲۰	۴۰-۳۰	۵۰-۴۰
MXYZ	۲/۲	۱/۷	۱/۵	۱/۴۵	۱/۳۸
3D-POM	۱/۹۸	۱/۵۷	۱/۴۷	۱/۴	۱/۳۴
MARFA	۱/۹۵	۱/۵۳	۱/۴۲	۱/۳۴	۱/۲۵

۴-۱ بررسی سربارهای MARFA

الگوریتم MARFA برای مسیریابی بسته‌های چندپخشی طراحی شده است که بایستی امکان پردازش حجم زیاد بسته و مدیریت ترافیک و بار شبکه را با سرعت و کارایی بالایی داشته باشد. البته پیاده‌سازی کارآمد این الگوریتم، سربار و هزینه خواهد داشت که در روش پیشنهادی با اعمال راهکارهایی سربارها به کمترین میزان کاهش داده شده‌اند. بسته‌های کنترلی، بسته‌هایی با حجم کم هستند که حاوی اطلاعات مورد نیاز سیستم فازی در MARFA می‌باشند. این اطلاعات شامل تعداد فلیت ذخیره شده در بافر ورودی، تعداد درخواست‌های همزمان به سوئیچ تقاطعی و تعداد سیکل تأخیر در بافر ورودی می‌باشد که هر کدام از این اطلاعات با بسته‌های کوچک مستقلی به صورت نشانه[۲۴] ارسال می‌شوند. این اطلاعات از یک مسیریاب به مسیریاب‌های مجاورش از طریق خطوط مجزا از خطوط بسته‌های داده ارسال می‌شوند. جداسازی مسیر داده و کنترل، موجب کاهش ازدحام و ترافیک و البته افزایش سرعت و بهره‌وری می‌شود. اما اطلاع از ترافیک لحظه‌ای و شرایط ازدحام، نیاز به تولید و ارسال تعداد زیادی بسته کنترلی دارد که برای شبکه روی تراشه هزینه و سربار دارد. مجزا نمودن مسیر بسته‌های کنترلی از بسته‌های داده نیز، موجب افزایش مساحت و حجم سخت‌افزار و در نتیجه، افزایش مصرف توان می‌شود.

برای کاهش سربار ناشی از تولید زیاد بسته‌های کنترلی و نیز مجزا نمودن خطوط داده و کنترل، در الگوریتم MARFA، راهکارهایی از جمله حذف کانال‌های مجازی، غیرفعال نمودن موقت پیوندهای مسدود و عدم ارسال بسته‌های کنترلی تکراری اعمال شده است.

عدم استفاده از کانال‌های مجازی در روش پیشنهادی، کاهش قابل توجه حجم سخت‌افزار، مساحت و مصرف توان را در پی دارد. لازم به ذکر است که بدون استفاده از کانال‌های مجازی، مسدود کردن پیوندهای با هزینه بالا بر اساس سیستم فازی، مانع بروز بن‌بست و قفل زنده در MARFA می‌شود. غیرفعال نمودن موقت پیوندهای مسدود با کاهش سطح ولتاژ منبع تغذیه آن پیوند در راستای کاهش مصرف توان ایستا می‌باشد. همانطور که در بخش سوم توضیح داده شد، در MARFA، بسته‌های کنترلی فقط در صورت وجود ازدحام در یک مسیریاب و تغییر مقدار شمارنده‌ها، بسته کنترلی تولید و ارسال می‌شود. این سیاست‌ها، در راستای کاهش تعداد بسته‌های کنترلی ردوبدل شده و در نتیجه، کاهش سربار بسته‌های کنترلی می‌شد.

به منظور بررسی سربار پیوندهای بسته‌های کنترلی، یک شبکه روی تراشه با الگوریتم مسیریابی MARFA، یکبار با در نظرگرفتن پیوندهای مشترک برای بسته‌های داده و کنترل (MARFA-1) و یکبار با مجزا کردن پیوندهای کنترلی از پیوندهای داده (MARFA-2) سنتز شده است. سنتز توسط ابزار Synopsys با استفاده از کتابخانه TSMC بر اساس جدول ۹ بیان شده‌اند. جدول ۱۰ مساحت و مصرف توان دو پیکربندی MARFA-1 و MARFA-2 را نشان می‌دهد. همانطور که نتایج در جدول نشان می‌دهند، اضافه کردن پیوندهای مجزا برای بسته‌های کنترلی موجب افزایش مساحت و نیز افزایش مصرف توان می‌شود.

جدول ۹: پارامترهای سنتز شبکه روی تراشه دوبعدی با الگوریتم پیشنهادی

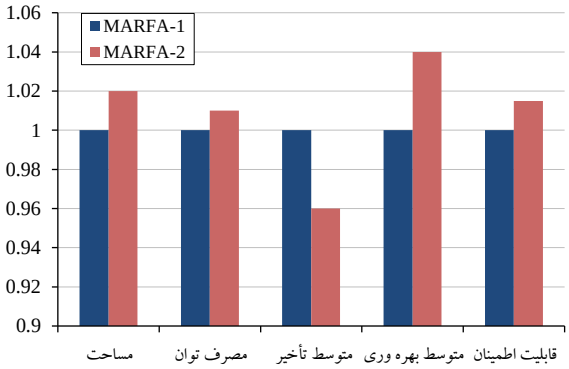
پارامتر	مقدار
اندازه شبکه	مش دوبعدی ۸×۸
الگوی ترافیکی	یکنواخت
اندازه فلیت	۳۲ بیت
اندازه بسته داده	۴ فلیت
اندازه بافر	۸ فلیت
تکنولوژی	۶۵ نانومتر
فرکانس	۵۰۰ مگاهرتز
ولتاژ منبع تغذیه	۱ ولت
اندازه بسته کنترلی	۸ بیت

جدول ۱۰: سربارمجزا نمودن مسیر بسته‌های داده و مسیر بسته‌های کنترل در الگوریتم پیشنهادی

	مساحت (میلی‌متر مربع)	**مصرف توان** (میلی‌وات)
MARFA-1	۸/۵۸	۹/۸۹
MARFA-2	۸/۶۴	۹/۹۲

به منظور بررسی تأثیر مجزا بودن مسیر بسته‌های کنترلی از بسته‌های داده بر کارایی، پیکربندی‌های MARFA-1 و MARFA-2 بر اساس پارامترهای جدول ۹ در محیط Noxim شبیه‌سازی شده است. نتایج شبیه‌سازی شامل متوسط تأخیر، متوسط بهره‌وری و قابلیت اطمینان به همراه نتایج سنتز شامل مساحت و مصرف توان در شکل ۱۳ نشان داده شده است. در این شکل همه نتایج به صورت نرمال شده هستند. همانطور که شکل نشان می‌دهد اضافه نمودن پیوندهای مجزا برای بسته‌های کنترلی موجب افزایش کارایی الگوریتم پیشنهادی از لحاظ تأخیر، بهره‌وری و قابلیت اطمینان می‌شود که در قبال افزایش مساحت و مصرف توان بسیار قابل توجه می‌باشد. مسیر مشترک برای تبادل بسته‌های داده و بسته‌های کنترلی موجب افزایش ازدحام، افزایش تأخیر و افزایش بسته‌های از دست رفته می‌شود.

[Downloaded from joc-isice.ir on 2026-11-12]
[DOR: 20.1001.1.20088345.1400.15.1.4.9]
[DOI: 10.52547/joc.15.1.113]



شکل ۱۳: کارایی و سربار یک شبکه روی تراشه با الگوریتم مسیریابی MARFA، با در نظرگرفتن پیوندهای مشترک برای بسته‌های داده و کنترل (MARFA-1) و با مجزا کردن پیوندهای کنترلی از پیوندهای داده (MARFA-2)

۵- نتیجه‌گیری

در شبکه‌های روی تراشه، با توجه به برنامه کاربردی، بعضی از گره‌ها بسته‌های زیادی به شبکه وارد می‌کنند که باعث می‌شود شبکه با توزیع بار نامتعادل روبه‌رو شود. این بار نامتعادل موجب ایجاد گلوگاه‌هایی در شبکه می‌شود که ازدحام در برخی گره‌ها را به همراه دارد. ازدحام منجر به افزایش تأخیر و نیز افزایش از دست رفتن بسته‌ها و در نتیجه کاهش کارآیی شبکه می‌شود. با کنترل ترافیک و متعادل‌کردن بار ترافیکی در شبکه می‌توان از وقوع ازدحام تا حدود زیادی جلوگیری کرد. این امر در این مقاله، با افزایش آگاهی از وضعیت ازدحام در شبکه و هدایت بسته‌های ارسالی به ناحیه‌های خلوت‌تر بر اساس منطق فازی حاصل می‌شود. الگوریتم مسیریابی پیشنهادی این مقاله، مناسب برای شبکه‌های روی تراشه دوبعدی و سه‌بعدی مبتنی بر همبندی مش می‌باشد و بسته‌های چندپخشی و تک‌پخشی را به صورت تطبیقی به مقصد می‌رساند. نتایج شبیه‌سازی‌ها و ارزیابی‌ها نشان دادند که الگوریتم پیشنهادی از لحاظ بهره‌وری، تأخیر و قابلیت اطمینان نسبت به الگوریتم‌های مسیریابی چندپخشی که اخیراً ارائه شده‌اند، بهتر عمل می‌کند.

مراجع

[1] P. Lotfi-Kamran, A.M. Rahmani, M. Daneshtalab, A. Afzali-Kusha, Z. Navabi, “EDXY – A low cost congestion-aware routing algorithm for network-on-chips,” Journal of Systems Architecture, vol. 56, Issue 7, pp. 256-264, 2010.

[2] H. Naghibi Jouybari, K. Mohammadi, “A Low Overhead, Fault Tolerant and Congestion Aware Routing Algorithm for 3D Mesh-Based Network-on-Chips,” Microprocessor and Microsystems, vol. 38, Issue 8, pp. 991-999, 2014.

[3] C. Wang, A. W. Hu, N. Bagherzadeh, “Scalable Load Balancing Congestion-Aware Network-on-Chip Router Architecture”, Computer and System Sciences, vol. 79, no. 4, pp. 421-439, 2013.

[4] M. Ebrahimi, M. Daneshtalab, P. Liljeberg, J. Plosila, H. Tenhunen, “Efficient Congestion-Aware Selection Method for On-chip Networks”, 6th International Workshop on Reconfigurable Communication-Centric Systems-on-Chip (ReCo-SoC), pp. 1–4, 2011.

[5] F. Farahnakian, M. Ebrahimi, M. Daneshtalab, P. Liljeberg, J. Plosila, “Adaptive Reinforcement Learning Method for Networks-on-Chip”, International Conference on Embedded Computer Systems (SAMOS), pp. 236–243, 2012.

[6] M. Ebrahimi, M. Daneshtalab, P. Liljeberg, H. Tenhunen, “Performance Evaluation of Unicast and Multicast Communication in Three-Dimensional Mesh Architectures,” 15th CSI International Symposium on Computer Architecture and Digital Systems (CADS), pp. 161–162, 2010.

[7] K. Somasundaram, J. Plosila, N. Viswanathan, “Deadlock Free Routing Algorithm for Minimizing Congestion in a Hamiltonian Connected Recursive 3D-NoCs”, Micro-electronics, vol. 45, no. 8, pp. 989-1000, 2014.

[8] M. Ebrahimi, M. Daneshtalab, P. Liljeberg, H. Tenhunen, “HAMUM - A Novel Routing Protocol for Unicast and Multicast Traffic in MPSoCs,” 18th Euromicro Conference on Parallel, Distributed and Network-based Processing (PDP), pp. 525 –532, 2010.

[9] P. Bahrebar, D. Stroobandt, “The Hamiltonian-based Odd–even Turn Model for Maximally Adaptive Routing in 2D Mesh Networks-on-Chip”, Computer and Electrical Engineering, vol. 45, pp. 386-401, 2015.

[10] W.C. Tsai, K.C. Chu, Y.H. Hu, S. J. Chen, “Non-minimal, Turn-model Based NoC Routing”, Microprocessors and Microsystems, vol. 37, Issue 8, pp.899-914, 2012.

[11] M. Daneshtalab, M. Ebrahimi, P. Liljeberg, J. Plosila, H. Tenhunen, “Memory Efficient On-chip Network with Adaptive Interfaces”, IEEE Transactions on Computer-Aided Design, vol. 31, no. 1, pp. 146–159, 2012.

[12] M. Ebrahimi, H. Tenhunen, M. Dehyadegari “Fuzzy-based Adaptive Routing Algorithm for Networks-on-Chip”, Systems Architectures, vol. 59, no. 7, pp. 516-527, 2013,.

[13] K. Tatas, C. Chrysostomou, “Hardware Implementation of Dynamic Fuzzy Logic Based Routing in Network-on-Chip,” Microprocessors and Microsystems, vol. 52, pp. 80-88, 2017.

[14] H. Phan, X. Tran, “Fuzzy-logic Based Low Power Solution for Network-on-Chip Architectures,” International Conference on Advanced

[Downloaded from joc-isice.ir on 2026-11-12]
[DOR: 20.1001.1.20088345.1400.15.1.4.9]
[DOI: 10.52547/joc.15.1.113]

[Downloaded from joc-isice.ir on 2026-11-12]
[DOR: 20.1001.1.20088345.1400.15.1.4.9]
[DOI: 10.52547/joc.15.1.113]

Networks-on-Chip," 16th Asia and Pacific Design Automation Conference (ASP-DAC), pp. 363-368, 2011.

[26] F. Nasiri, H. Sarbazi-Azad, A. Khademzadeh, "Reconfigurable Multicast Routing for Networks on Chip," Microprocessors and Microsystems, vol. 42, pp. 180-189, 2016.

[27] M.R. Arun, P.A. Jisha, J. Jose, "A Novel Energy Efficient Multicasting Approach for Mesh NoCs," Procedia Computer Science, vol. 93, pp. 283-291, 2016.

[28] M.R. Arun, P. A. Jisha, "SMDP-single Message Duplicate in Partition, a Multicast Routing Method in Mesh 2D NoC," 3rd International Conference on Innovations in Information Embedded and Communication Systems, pp. 676-680, 2016.

[29] W. Xiaohang, M. Palesi, J. Yingtao, M.C. Huang, L. Peng, "Low Latency and Energy Efficient Multicasting Schemes for 3D NoC-based SoCs," IEEE/IFIP International Conference of VLSI and System-on-Chip (VLSI-SoC), pp. 337-342, 2011.

[30] Z. Liu, N. Wu, L. Zhou, G. Yan, "A Path Optimized Multicast Routing Algorithm for 3D Network-on-Chip," The World Congress on Engineering and Computer Science (WCECS), 2015.

زیرنویس‌ها

[1] System-on-Chip
[2] Network-on-Chip
[3] Three-dimensional die stacking
[4] Congestion
[5] Virtual channels
[6] Crossbar switch
[7] Unicasting
[8] Multicasting
[9] Livelock
[10] Deadlock
[11] Unicast-based multicasting
[12] Tree-based multicasting
[13] Path-based multicasting
[14] Minimum spanning tree
[15] Partitioning
[16] Column Path
[17] Multi path
[18] Multicast Adaptive Reliable Fuzzy-based routing Algorithm
[19] Warm-up
[20] Power-Delay-Product
[21] Saturation troughput
[22] Uniform
[23] Hotspot
[24] Token

Technologies for Communications (ATC), pp. 334-338, 2016.

[15] K.J. Lee, C.Y. Chang, H.Y. Yang, "An Efficient Deadlock-Free Multicast Routing Algorithm for Mesh-Based Networks-on-Chip," International Symposium onVLSI Design, Automation, and Test (VLSI-DAT), pp. 1–4, 2013.

[16] A. Karkar, T. Mak, K. Tong, A. Yakovlev, "A Survey of Emerging Interconnects for On-Chip Efficient Multicast and Broadcast in Many-Cores", IEEE Circuits and Systems Magazine, vol. 16, no. 1, pp. 58-72, 2016.

[17] Z. Wang, H. Gu, Y. Yang, H. Zhang, Y. Chen, "An Adaptive Partition-Based Multicast Routing Scheme for Mesh-Based Networks-on-Chip," Computers and Electrical Engineering, vol. 51, pp. 235-251, 2016.

[18] C. Wu, K. Lee, A.P. Su, "A Hybrid Multicast Routing Approach with Enhanced Methods for Mesh-Based Networks-on-Chip," IEEE Trans-actions on Computers, vol. 67, no. 9, pp. 1231-1245, 2018.

[19] M. Ebrahimi, M. Daneshtalab, J. Plosila, "Fault-tolerant Routing Algorithm for 3D NoC Using Hamiltonian Path Strategy," Design, Automation & Test in Europe Conference & Exhibition (DATE), pp. 1601-1604, 2013.

[20] N. K. Meena, H.K. Kapoor, S. Chakraborty, "A New Recursive Partitioning Multicast Routing Algorithm for 3D Network-on-Chip," 18th International Symposium on VLSI Design and Test, pp. 1-6, 2014.

[21] T. H. Vu, A.B. Abdallah, "Low-Latency K-Means Based Multicast Routing Algorithm and Architecture for Three Dimensional Spiking Neuromorphic Chips," IEEE International Conference on Big Data and Smart Computing (BigComp), pp. 1-8, 2019.

[22] L.Wei, Zhou, "An Equilibrium Partitioning Method for Multicast Traffic in 3D NoC Architecture," IFIP/IEEE International Conference on Very Large Scale Integration (VLSI-SoC), pp. 128-133, 2015.

[23] M. Ebrahimi, M. Daneshtalab, P. Liljeberg, J. Plosila, J. Flich, H. Tenhunen, "Path-Based Partitioning Methods for 3D Networks-on-Chip with Minimal Adaptive Routing," IEEE Transactions on Computers, vol. 63, no. 3, pp. 718-733, 2014.

[24] S. G. Nambiar, K. Swaminathan, G. Lakshmin-arayanan, S. Ko, "QaMC - QoS Aware Multicast router for NoC fabric," IEEE 27th Canadian Conference on Electrical and Computer Engineering (CCECE), pp. 1-6, 2014.

[25] W. Hu, Z. Lu, A. Jantsch, H. Liu, "Power-Efficient Tree Based Multicast Support for