****

**\*نشریه‌ی بین المللی مهندسی الکترونیک و کامپیوتر، 2013 میلادی\***

A hybrid packet-circuit switched router for optical network on Chip

**مطالعه‌ای بر:**

**یک مسیریاب سوئیچینگ ترکیبیِ مداری-بسته ای، برای شبکه‌ی نوری درون یک تراشه (ONoC)**

**چکیده**

**افزایش تعداد هسته‌های مالکیت فکری[[1]](#footnote-1) (IP) باعث شده تا شبکه‌های درون یک تراشه (NoC)[[2]](#footnote-2) ( یا به اصطلاح شبکه روی تراشه) با چالش‌هایی روبرو باشند. نانوفوتونیک های سیلیکونی[[3]](#footnote-3) به یک فناوری عمده مبدل گردیده‌اند، چرا که مزایای متعددی را برای شبکه درون یک تراشه به همراه دارند. همچنین، خدمات درون یک تراشه[[4]](#footnote-4)، اعم از خدمات تضمین شده و خدمات بهترین کوشش[[5]](#footnote-5)، از مشخصه‌های ترافیکی مختلفی برخوردار می‌باشند. این مسئله می‌تواند تأثیری مهم بر روی کارائی شبکه درون یک تراشه داشته باشد. در این مقاله به ارائه‌ی یک مسیریاب سوئیچینگ مدار بسته برای شبکه‌ی نوری درون یک تراشه (ONoC) می‌پردازیم. این مسیریاب می‌تواند از سوئیچینگ مداری (OCS) و سوئیچینگ نوری بسته‌ ای (OPS) به شکلی موازی و همزمان پشتیبانی کرده تا بتواند کارائی شبکه را از طریق هر دو سرویس بهبود دهد. با توجه به نتایج شبیه‌سازی، معماری پیشنهادی می‌تواند به تأخیر پایین‌تر و توان عملیاتی بالاتری نسبت به معماری‌های معمول و آن‌هم در همان مقیاس دست پیدا کند.**

**مقدمه**

**با افزایش چگالیِ ادغام[[6]](#footnote-6) در یک تراشه، دستاوردهای اخیر در حوزه‌ی طراحی تراشه نشان می‌دهد که پیشرفت‌هایی به سمت طراحی‌های چند هسته‌ای در حال جریان می‌باشد. با توجه به اینکه تعداد هسته‌های مالکیت فکری (IP) که در یک تراشه ادغام گردیده‌اند در حال افزایش می‌باشد، کارائی شبکه‌ی درون یک تراشه با محدودیت‌هایی اعم از مصرف انرژی، تأخیر داده‌ها، توان عملیاتی و غیره روبرو می‌باشد. اتصالات سراسری در این شبکه به یک عامل اصلی و تأثیرگذار بر روی کل کارائی شبکه مبدل گردیده است چرا که نقش مهمی را در اتصال هسته‌های IP بازی می‌کند. در حال حاضر نیاز فزاینده‌ای به اتصالات الکترونیکی متعارف وجود دارد، به گونه‌ای که بتوانند توان عملیاتیِ بالا مقیاس و سرعت را در یک شبکه‌ای که از هسته‌های IP زیادی استفاده می‌کند، تضمین نماید. البته اتصالات الکترونیکی عملکرد خوبی در حوزه‌ی بهره‌وری انرژی و مقیاس‌پذیری کارائی ندارند [1]. همچنین مسئله‌ی قابلیت اطمینان را نیز باید در نظر گرفت [2].**

**یک راهکار برای حل این گلوگاه‌هایی که در بالا مطرح شد، اتصالات نوری با سرعت بالای انتشار سیگنال، چگالی بالای پهنای باند و مصرف کم انرژی می‌باشد. بر مبنای پلت فرم سیلیکون روی عایق (SOI)، بسیاری از دستگاه‌های نوری که می‌توانند در NoC ها بکار گرفته شوند دارای دستاوردهای قابل ملاحظه‌ای می‌باشند [3-9]. این باعث شده تا اتصالات نوری به یک فناوری جذاب مبدل گردند. در نتیجه، بر مبنای فوتونیک‌های سیلیکونی، چندین نمونه معماری برای NoC از سوی گروه‌های تحقیقاتی مختلف ارائه شده است.**

**خدمات موجود در NoC را می‌توان به دو دسته‌بندی تقسیم کرد: خدمات تضمینی و خدمات بهترین کوشش. ترافیک خدمات مختلف، دارای مشخصه‌های مختلفی می‌باشند. خدمات تضمینی باید بعضی از منابع را برای خود رزرو نموده تا بتواند توان عملیاتی را تضمین نموده و اغلب ترافیک این خدمات تضمینی طولانی بوده و در عین حال ماهیتی پیوسته دارند. خدمات بهترین-کوشش، نیازی به رزرو منابع در جهت تضمین کارائی نداشته و ترافیک آن نیز به طور معمول طول کوتاهی دارد. طراحی معماری مسیریاب، فرآیندی وابسته به مشخصه‌های ترافیکی در تراشه می‌باشد. بنابراین، یک مسیریاب که می‌تواند نیازمندی‌های دو دسته‌بندی از ترافیک‌ها را به صورت همزمان ارضا نماید، از مزایایی بر حسب تأخیر، توان عملیاتی و هزینه بر خوردار می‌باشد. اغلب طراحی‌های فعلی تنها از یک نوع مکانیسم سوئیچینگ استفاده می‌کنند که سوئیچینگ نوری مداری (OCS) یا سوئیچینگ نوری بسته (OPS) نام دارد. اگرچه در صورتی که ترافیک خدمات مختلف را بتوان با همان شِمای سوئیچینگ مدیریت کرد، بهره‌وری شبکه ممکن است کاهش پیدا کرده و هزینه‌ی عملیاتی افزایش پیدا کند.**

**در شبکه‌ی نوری درون یک تراشه (ONoC)، OCS می‌تواند ترافیکِ خدمات تضمینی را به شکلی کارآمد پردازش نماید ولی این شبکه برای ترافیک بهترین –کوش عملکرد بسیار مطلوبی ندارد [10]. OPS برای ترافیکِ خدمات بهترین- کوشش مطلوب می‌باشد ولی برای خدمات تضمینی آن‌چنان کارآمد نیست. برای ارضای نیازمندی‌های ترافیکی در خدمات بهترین-کوشش و خدمات تضمینی و آن‌هم به صورت همزمان، یک مسیریاب سوئیچینگ ترکیبی را برای ONoC ارائه می‌دهیم. روتر پیشنهادی می‌تواند ترافیک خدمات مختلف را به صورت مجزا پردازش نماید، بدین شکل که ترافیک را با طول موج‌های مختلف از هم تفکیک می‌سازد. بنابراین، این روتر می‌تواند به صورت موازی از هر دو مکانیسم OCS و OPS پشتیبانی نماید.**

**مابقی این مقاله را بدین شرح ارائه می‌دهیم. در بخش دوم، نگاهی مختصر به دستاوردهای فعلی در حوزه‌ی ONoC خواهیم داشت. در بخش سوم، تشریحی کامل از مسیریاب پیشنهادی اعم از معماری، شِماهای سوئیچینگ، کنترل جریان و تفکیک تصادم را ارائه خواهیم داد. در بخش چهارم به تحلیل کارائی انرژی و تلفات نوری می‌پردازیم و کارائی شبکه را از طریق شبیه‌سازی‌ها مورد ارزیابی قرار می‌دهیم. همچنین کارائی معماری‌های مختلف را مورد ارزیابی قرار می‌دهیم. در نهایت، نتیجه‌گیری‌ها را در بخش 5 ارائه می‌دهیم.**

**2. بیشینه**

**اتصالات نوری می‌توانند کارائی بهتری را نسبت به اتصالات الکتریکی به همراه داشته باشند. چندین معماری ONoC وجود دارند که متشکل از دستگاه‌های نانوفوتونیک می‌باشند. آقای کیانچتی و همکارانش [11] به ارائه‌ی یک شبکه‌ی نوری/الکتریکی ترکیبی تحت عنوان Phastlane پرداختند. روتر این شبکه می‌تواند به شکلی نوری اقدام به انتقال بسته‌ها از طریق چندین هاپ در شبکه نماید و از بافرهای الکتریکی برای حل مسئله‌ی مسدود شوندگی[[7]](#footnote-7) استفاده نماید. آقای جوشی و همکارانش [12] نیز شبکه‌ای را تحت عنوان Clos ارائه نمودند. این شبکه از یک فناوری سیلیکون-فونوتیکی برای ارتباطات سراسری روی تراشه استفاده می‌کند. این مکانیسم، از چندین روتر کوچک برای ایجاد یک شبکه‌ی بزرگ‌تر و غیر مسدود شونده استفاده می‌کند. آقای پال و همکارانش [13] نیز به ارائه‌ی یک توپولوژی سلسله مراتبی و مبتنی بر خوشه‌ها پرداختند و آن را FireFly نام‌گذاری کردند. در این شبکه، از اتصالات الکتریکی برای ارتباطات برون خوشه‌ای محلی و از کراس بارهای نوری برای ارتباطات بین خوشه‌ای سراسری استفاده نموده‌اند. کراس بار سراسری، به وسیله‌ی موج برهای گذرگاهی استفاده نموده‌اند. آقای شام و همکارانش [13] نیز یک معماری NoC فوتونیک را ارائه داده‌اند که متشکل از یک شبکه‌ی الکتریکی و یک شبکه‌ی فوتونیک می‌باشد. اطلاعات کنترلی، در یک شبکه‌ی الکتریکی مدیریت می‌گردد، در حالی که انتقال داده‌ها در شبکه‌ی فوتونیک رخ می‌دهد. قبل از پردازش فرآیند انتقال داده‌ها، یک بسته‌ی ستاپ مسیر الکتریکی در شبکه‌ی الکتریکی مسیریابی شده تا بتوان مسیریاب های شبکه‌ی نوری را از منبع تا مقصد مسیریابی کرد. این کار به منظور ایجاد یک مسیر داده‌ای نوری صورت می‌گیرد. پس از ایجاد مسیر، فرآیند انتقال داده‌ها آغاز می‌گردد. در نهایت، یک بسته به منظور از بین بردن این مسیر ارسال می‌شود. معماری CORONA که یک معماری نوری 3 بعدی و چند هسته‌ای می‌باشد، برای پردازنده‌های 16 نانومتری در سال 2017 میلادی طراحی شده که توسط آقای وانتراس و همکارانش [15] توسعه یافته است؛ این معماری از اتصالات کراس بار فوتونیک با 256 هسته در قالب 64 خوشه‌ی 4 هسته‌ای استفاده می‌کند. این کراس بار، از گذرگاه‌های یک بار نوشتن، چند بار خواندن متعددی تشکلی شده که با معماری تسهیم تقسیم-موج (WDM) ترکیب شده تا بتواند پهنای باند بالاتری را عرضه دارد. برای حل این تعارض، یک شِمای داوری مبتنی بر توکن برای تخصیص کانال‌های موجود به خوشه‌ها بکار گرفته شده است. آقای کریمان و همکارانش [16] به ارائه‌ی یک سیستم نوری-الکتریکی سلسله مراتبی و آن‌هم بر مبنای گذرگاه حلقه‌ی مشترک پرداخته‌اند تا بتوانند از انسجام کش در مالتی پروسسور های تراشه‌ آینده (CMP) پشتیبانی نماید. کل 64 هسته در قالب چهار گره سازمان دهی شده‌اند که هر کدام دارای 4 هسته و یک کش سطح 2 می‌باشند. از معماری گذرگاه برای ارتباطات بین گره استفاده می‌شود. آقای باتن و همکارانش [17] به توسعه‌ی یک شبکه‌ی جدید پردازنده-حافظه در توپولوژی مش و آن‌هم بر مبنای کراس بار سراسری الکتریکی-نوری پرداخته‌اند تا بتوانند بهبود کارائی را برای پهنای باند چند هسته‌ای به همراه داشته باشند. آقای مایلر و همکارانش [18]نیز یک معماری چند هسته‌ای منظم را بر مبنای موج بر Snak-shape ارائه نموده‌اند که از فناوری گره­ی 11 نانومتری با حداقل 1000 هسته پشتیبانی می‌کند. دو شبکه با نام‌های شبکه‌ی الکتریکی برای ارتباطات کوتاه برد و شبکه‌ی نوری برای ارتباطات بلند برد وجود دارد. کرمن و مارتینز [19] به ارائه‌ی یک طراحی برای ONoC پرداخته‌اند که متشکل از روتر های طول موج نوری می‌باشد. این روتر ها، از طریق الگوریتم مسیریابی مبتنی بر طول موج و الگوریتم مسیریابی فراموشکار به هم متصل شده‌اند تا یک شبکه‌ی تمام نوری را برای CMP ها ایجاد نمایند. آقای کوهی و همکارانش [20] نیز به ارائه‌ی یک شبکه‌ی روی تراشه تمام نوری در یک توپولوژی مقیاس‌پذیر و منظم با نام 2D-HERT پرداخته‌اند. این توپولوژی از نوع جدیدی از سوئیچ‌های نوری با نام WaROS استفاده می‌کند. آقای لی و همکارانش [21] به معرفی یک شبکه‌ی روی تراشه نوری پرداخته‌اند که متشکل از یک زیر شبکه‌ی چند پخشی/همه پخشی برای ارتباطات حساس به تأخیر بوده و همچنین یک زیر شبکه‌ی سوئیچینگ مداری را برای ترافیک ارتباطیِ حساس به توان عملیاتی ارائه نموده‌اند. این شبکه می‌تواند کارائیِ تأخیر و توان عملیاتی را بهینه‌سازی نماید. بارر و همکارانش [22] به مطالعه‌ی یک ONoC مبتنی بر** $λ-router$ **پرداخته‌اند. فرآیند سوئیچینگ در این شبکه، بسته به مقدار طول موج سیگنال نوری تکمیل می‌شود. آقای پاسریچا و همکارانش [23] نیز به ارائه‌ی یک معماری ارتباطی روی تراشه بر مبنای حلقه‌ی نوری برای نسل بعدی از سیستم‌های روی تراشه چند پردازنده‌ای (MPSoCS)[[8]](#footnote-8) پرداخته‌اند. اتصالات حلقه‌ی نوری نیز برای جایگزینی اتصالات الکتریکی خط لوله‌ی سراسری مورد استفاده قرار گرفته است. این اتصالات می‌توانند بر موانع اتصالات الکتریکی غلبه نمایند. آقای وو و همکارانش [24] نیز به ارائه‌ی یک شبکه‌ی برون تراشه­ای/بین تراشه‌ای نوری تحت عنوان UNION پرداخته‌اند. این شبکه، از یک شبکه‌ی نوری سلسله مراتبی برای تفکیک ترافیک ارتباطی بین تراشه و ترافیک ارتباطی برون تراشه‌ای استفاده می‌کند. خوشه‌ی پردازنده‌ی محلی در این شبکه، از طریق اتصالات الکتریکی به هم متصل می‌باشد در حالی که ارتباطات بین خوشه‌ها، به وسیله‌ی اتصالات نوری صورت می‌گیرد. یک روش کنترلی متمرکز نیز برای پیکربندی مسیرها مورد استفاده قرار می‌گیرد. این روش، یک روش سوئیچینگ مداری نوری می‌باشد. خوشه‌ی پردازنده‌ی محلی، به وسیله‌ی اتصالات الکتریکی بهم متصل می‌باشد، در حالی که ارتباطات بین خوشه‌ها از طریق اتصالات نوری صورت می‌گیرد. یک روش کنترلی متمرکز نیز برای پیکربندی مسیرها مورد استفاده قرار می‌گیرد. این روش، یک روش سوئیچینگ مداری نوری جدیدی می‌باشد. آقای بوکس و همکارانش [25] به ارائه‌ی یک شبکه‌ی روی تراشه حلقه نوری (ORNoC) پرداخته‌اند که شامل اتصالات الکتریکی و مبرا از ازدحام بوده و از آن در لایه‌ی بین/برون خوشه‌ای استفاده می‌گردد، و این در حالی است که از اتصالات نوری در لایه‌ی بین/برون خوشه‌ای استفاده می‌شود. همین طول موج را می‌توان در یک موج بر تکی استفاده نموده و طول موج را به اشتراک گذاشت.**

**روتر های نوری فشرده نیز از جمله مؤلفه‌های اساسی برای ONoC ها می‌باشند. آقای بیبرمن و همکارانش [26] به طراحی یک روتر فوتونیک چهار پورت و غیر مسدود کننده برای ONoC ها پرداخته‌اند که در آن، از هشت تشدید کننده‌ی میکرو رینگ استفاده شده است. هر دوی مسیریاب ها، از نوع غیر مسدود شونده می‌باشند. تشدید کننده‌ها نیز دارای شعاع یکسان بوده که با تبعیت از تأثیر گرمایی-نوری تعدیل گردیده است. آقای تان و همکارانش [29] نیز به ارائه‌ی یک مسیریاب نوری با طول موج (GWOR) پرداخته‌اند که مبتنی بر تشدید کننده‌های میکرو رینگ بوده و می‌توان آن را برای شبکه‌های انفعالی مناسب دانست. مسیریابی در روتر پیشنهادی، با استفاده از شکل موج‌های سیگنال مختلف و تشدید کننده‌های میکرو رینگ که هندسه‌های مختلفی دارند، شکل می‌گیرد. آقای هو و همکارانش [30] به طراحی یک مسیریاب نوری چهار پورت و غیر مسدود شونده با قابلیت انتخاب طول موج پرداخته‌اند. در این روتر، سیگنال‌ها بر اساس طول موجشان مسیریابی می‌شوند. تشدید کننده‌های انفعالی، در مقاطع موج بر مناسبی قرار داده شده تا بتواند مسیر ثابتی را بین پورت‌های ورودی و خروجی ایجاد نماید. کیانچتی و همکارانش [31] به ارائه‌ی یک روتر نوری جدید برای CMP های آینده پرداخته‌اند. این روتر از یک الگوریتم مسیریابی که از قبل کد گذاری شده است برای مسیریابی بسته‌ها استفاده کرده و از یک کنترلر روتر محلی نیز برای حذف تأخیر ناشی از ایجاد مسیر OCS استفاده کرده و از کنترلر جریان on/off نیز برای اجتناب از تلفات بسته در معماری پیشنهادی قبلی استفاده می‌کند.**

**اغلب این طراحی‌ها، از مکانیسم سوئیچینگ مداری و یا مکانیسم سوئیچینگ بسته­ای استفاده می‌کنند که برای پشتیبانی از خدمات تضمینی و خدمات بهترین تلاش مناسب نیست.**

**3. معماری پیشنهادی برای مسیریاب سوئیچینگ ترکیبی**

**3.1 المان‌های سوئیچینگ مبتنی بر تشدید کننده‌ی میکرو رینگ**

**مسیریاب نوری، که مسئولیت مسیریابی پیام‌ها را از سمت پورت ورودی به پورت خروجی بر عهده دارد، یکی از بخش‌های اساسی در ONoC می‌باشد. تشدید کننده‌های میکرو رینگ را می‌توان بلاک‌های ساختمانی مهمی برای یک مسیریاب نوری دانست. تشدید کننده‌ی میکرو رینگ می‌تواند با تغییر طول موج و آن‌هم از طریق تأثیرات گرمایی-نوری و یا نوری-الکتریکی ایفای نقش نماید. این ویژگی باعث تغییر وضعیت اِلمان سوئیچینگ مبتنی بر تشدید کننده می‌گردد [28]. در شکل 8 (بخش a و b)، دو وضعیت برای اِلمان سوئیچینگ مبتنی بر تشدید کننده‌ی میکرو رینگ نمایش داده شده است. زمانی که اِلمان سوئیچینگ در وضعیت off قرار داشته باشد، نقش یک تشدید کننده را در طول موج** $λ\_{off}$ **بازی می‌کند. یک سیگنال نوری ورودی با طول موج** $λ(λ\ne λ\_{off})$ **نیز از پورت ورودی به سمت پورت خروجی منتقل می‌شود. در زمانی که اِلمان سوئیچینگ در وضعیت on قرار داشته باشد، طول موج تشدید کننده، از** $λ\_{off}$ **به** $λ\_{on}$ **تغییر می‌کند. یک سیگنال نوری ورودی با طول موج** $λ(λ\ne λ\_{on})$ **نیز در تشدید کننده‌ی میکرو رینگ در پورت ورودی کوپل شده و به سمت پورت drop حرکت می‌کند.**

**3.2 معماری مسیریاب**

**در شکل 2، معماری مسیریاب نوری** $N×N$ **پیشنهادی نمایش داده شده است؛ این معماری، از یک واحد کنترل OPS، واحد کنترل OCS، واحد تسهیم کننده، واحد بافر، واحد تقسیم کننده، کراس بار نوری و واحد کنترل جریان تشکیل شده است. تعداد N، وابسته به توپولوژی شبکه می‌باشد. برای مثال، برای یک شبکه‌ی مش دو بعدی، مقدار N برابر با 5 می‌باشد. روتر می‌تواند از هر دوی OCS و OPS پشتیبانی نماید؛ این روتر به وسیله‌ی واحد کنترل OCS و واحد کنترل OPS پشتیبانی می‌شود. طول موج** $λ\_{1}$ **بکار گرفته شده تا پیام‌هایی در OCS ارسال شود، در حالی که** $λ\_{2}$ **برای OPS بکار گرفته شده است.**

**هر پورت ورودی، با واحد کنترل OPS ارتباط برقرار نموده تا بتواند اطلاعاتِ ضروری مسیریابی را برای واحد کنترل OPS فراهم سازد. واحد کنترل OPS اقدام به پیاده‌سازی محاسبات و داوری در مسیریابی می‌کند. الگوریتم مسیریابی که باید بکار گرفته شود، بر اساس ویژگی شبکه انتخاب می‌شود. برای مثال، در شبکه‌ی مش دو بعدی، از الگوریتم مسیریابی XY استفاده می‌شود. واحد تقسیم کننده، می‌تواند یک پیام را در بافر قرار داده و یا آن را به سمت جلو ارسال نماید؛ این واحد، به وسیله‌ی واحد کنترل OPS کنترل می‌شود. یک خروجی در این واحد تقسیم کننده، به بافر خروجی و سپس واحد تسهیم کننده متصل می‌باشد. خروجی دیگر، به صورت مستقیم به واحد تسهیم کننده متصل می‌باشد. ساختار تقسیم کننده و واحد تسهیم کننده که در این روتر پیشنهادی بکار گرفته شده‌اند، در سمت راست شکل 2 نمایش داده شده‌اند. واحد تقسیم کننده، واحد بافر و واحد تسهیم کننده، بر اساس واحد کنترل OPS و آن‌هم بر اساس نتایج محاسبات و داوری در مسیریابی مشخص می‌شود. تشدید کننده‌ی میکرو رینگ، بر مبنای کراس بار نوری بوده که واحد تسهیم کننده را به پورت‌های خروجی متصل کرده و مسئولیت ایجاد مسیرهای مختلف در بین پورت‌های ورودی و خروجی مختلف را بر عهده دارد. این واحدها به وسیله‌ی واحد کنترل OPS و واحد کنترل OCS و آن‌هم به شکلی مشارکتی کنترل می‌شود. واحد کنترل OPS اقدام به مدیریت تشدید کننده‌های میکرو رینگ با طول موج** $λ\_{2}$ **(در وضعیت on) در مکانی مناسب از کراس بار نوری می‌کند که البته این کار بر مبنای نتایج محاسباتی و داوری صورت می‌گیرد. واحد کنترل OCS، مسئولیت مسیریابی پیام‌های کنترل الکتریکی در OCS را بر عهده دارد. با توجه به نتایجی که از محاسبه‌ی مسیریابی به دست می­آید، واحد کنترل OCS اقدام به مدیریت تشدید کننده‌های میکرو رینگ با طول موج** $λ\_{1}$ **در کراس بار نوری می‌کند و از این رو باید یک مسیر نوری را از قبل ایجاد نموده باشد. واحد کنترل جریان، اقدام به پیاده‌سازی تابع کنترل جریان** $on/off$ **می‌کند. این واحد، مسئولیت تشخیص وضعیت بار الکتریکی ورودی در روتر محلی را بر عهده داشته تا به موجب آن بتواند سیگنال کنترل جریان را به سمت روتر بعدی ارسال نماید. همچنین این واحد می‌تواند سیگنال کنترل جریان را از روتر قبلی دریافت کرده تا واحد کنترل OPS را تشخیص داده و بتواند وضعیت بافر را در نظر بگیرد.**

****

**شکل 1: (a): اِلمان سوئیچینگ در وضعیت off، (b) المان سوئیچینگ در وضعیت on**

****

**شکل 2: معماری مسیریاب پیشنهادی**

**در حال حاضر هیچ بافر نوری برای ذخیره‌سازی مستقیم بسته‌ها در دامنه‌ی نوری وجود ندارد. در زمانی که دو یا چند بسته باید بر روی یک پورت خروجی در OPS و آن‌هم به صورت همزمان رقابت نمایند، یک تصادم پیش خواهد آمد. بنابراین نیاز به یک شِمای برطرف نمودن تصادم می‌باشد چرا که تنها یک بسته را می‌توان در هر زمان به یک پورت خروجی ارسال کرد. در صورتی که دسته‌ای با طول موج** $λ\_{2}$ **نتواند در طی فرآیند تصادم به پورت خروجی مطلوب خود برسد، واحد کنترل OPS اقدام به روشن کردن تشدید کننده‌ها در واحد تقسیم کننده‌ی متناظر می‌کند. این بسته به صورت الکتریکی دریافت شده و در واحد بافر، بافر می‌شود و منتظر شانس بعدی برای ارسال می‌ماند. در زمانی که بسته‌های بافر شده و بسته‌های جدید بر سر یک پورت خروجی با هم تصادم داشته باشند، بسته‌های بافر شده دارای اولویت بالاتری خواهند بود. زمانی که بسته‌های بافر شده مجوز ارسال را داشته باشند، مجدد به یک سیگنال نوری تبدیل شده و در واحد مسیریاب‌های نوری به سمت مقصدهای ارتباطی مسیریابی می‌شوند.**

**تشدید کننده‌ی میکرو رینگ که مبتنی بر کراس بار نوری بوده و به عنوان مهم‌ترین اِلمان در روتر پیشنهادی تلقی می‌شود، متشکل از موج برها و دو گروه از تشدید کننده‌های میکرو رینگ می‌باشد. یک گروه، دارای طول موج** $λ\_{1}$ **بوده که از آن برای OCS استفاده شده و دیگری دارای طول موج** $λ\_{2}$ **بوده که از آن برای OPS استفاده می‌شود. طول موجی که در وضعیت** $off$ **قرار دارد، نه از نوع** $λ\_{1}$ **می‌باشد و نه از نوع** $λ\_{2}$**. N پورت، به ترتیب متناظر با N پورت روتر می‌باشند. کراس بار نوری، نقش یک سوئیچینگ غیر مسدود شونده را بازی کرده که می‌تواند با تغییر وضعیت و چیدمان تشدید کننده‌های میکرو رینگ در دو طول موج بکار گرفته شود. کراس بار نوری، به وسیله‌ی سیگنال‌های الکتریکی (که توسط واحد کنترل OCS و واحد کنترل OPS ایجاد شده‌اند) کنترل می‌شود. یک نمونه از کراس بارهای نوری** $5×5$ **در شکل 3 نمایش داده شده است. می‌توان از این کراس بار در توپولوژی مِش استفاده نمود. این کراس بار، متشکل از 15 موج بر، 21 تشدید کننده‌ی میکرو رینگ با طول موج** $λ\_{1}$ **(در وضعیت on) و 24 تشدید کننده‌ی میکرو رینگ با طول موج** $λ\_{2}$ **در وضعیت** $on$ **می‌باشد.**

**فرض کنید که دو پیام با طول موج‌های** $λ\_{1}$ **و** $λ\_{2}$ **در پورت 1 تزریق شده باشند و به سمت پورت 4 حرکت می‌کنند (شکل 3). سه تشدید کننده‌ی میکرو رینگ با طول موج** $λ\_{1}$ **(در وضعیت on) از پورت 1 به سمت پورت 4 وجود داشته که به ترتیب به صورت** $c2,c1$ **و** $C3$ **شماره گذاری می­شوند. این تشدید کننده‌ها به ترتیب دارای وضعیت** $off$**،** $on $ **و** $off$ **می‌باشند. از این رو پیامی با طول موج** $λ\_{1}$ **می‌تواند جای** $C2$ **را بگیرد. در این شکل، روتر به صورت یک مسیر سیگنال OCS نمایش داده شده است. به طور مشابه، تشدید کننده‌های میکرو رینگ را با طول موج** $P1$**،** $P2$**،** $P3$ **و** $P4$ **از سمت پورت 1 به سمت پورت 4 مشخص می‌کنیم. قبل از انتقال پیام در طول موج** $λ\_{2}$**، تشدید کننده‌های P1 و P2 وارد وضعیت** $on$ **می‌شوند و دو تشدید کننده‌ی دیگر وارد وضعیت** $off$ **می‌شوند. به دنبال آن، پیام موجود در** $λ\_{2}$ **در داخل تشدید کننده‌ی** $p1$ **کوپل شده، و سپس** $p2$ **را دور زده و با تشدید کننده‌ی** $p3$ **کوپل شده و از** $P4$ **عبور می‌کند. این مسیر، به صورت یک مسیر سیگنال OPS نمایش داده شده است.**

**3.3 مکانیسم سوئیچ**

***معماریِ مسیریاب پیشنهادی می‌تواند از دو مکانیسم سوئیچینگ که منظور آن، OCS و OPS می‌باشد پشتیبانی نماید. انتخاب مکانیسم سوئیچینگ برای انتقال پیام، به وسیله‌ی گره­ی منبع مشخص می‌شود.***

***زمانی که ترافیکِ ایجاد شده، به خدمات تضمینی نیاز دارد، OCS بکار گرفته شده تا بتوان پیام را تحویل داد. یک بسته‌ی کنترل الکتریکی، با نام بسته‌ی ستا مسیر نیز به وسیله‌ی واحد کنترل OCS مسیریابی شده تا بتوان یک مسیر داده‌ای را برای انتقال داده‌های نوری در روتر های نوری ایجاد نمود. پس از موفقیت ستاپ مسیر، داده‌های نوری در امتداد مسیر و آن‌هم بدون وقفه منتقل می‌شوند. بنابراین، OCS می‌تواند توان عملیاتی را تضمین نماید.***

******

***شکل 3: کراس بار نوری که برای یک توپولوژی مِش مورد استفاده قرار گرفته است.***

 ***علاوه بر OCS، یک مکانیسم سوئیچینگ دیگر با نام OPS بکار گرفته شده تا بتوان ترافیک مورد نیاز خدمات بهترین-کوشش را تحویل داد. در OCS، اطلاعات داده‌ها و کنترل از هم جدا شده در حالی که در OPS، اطلاعات مسیریابی در داخل بسته‌های نوری بکار گرفته شده است. پس از اینکه بسته‌های نوری به وسیله‌ی منبع ارتباطی ایجاد شد، این بسته‌ها به وسیله‌ی مسیریاب های نوری، مسیریابی می‌شوند. علاوه بر این، هیچ نیازی به رزرو منبع از قبل نیست. همچنین بسته‌های نوری به صورت اختیاری مسیریابی می‌شوند. در مقایسه با OCS، منابع برای مدت زمان زیادی اشغال نمی‌شوند و این مسئله باعث افزایش نرخ بکار گیری منبع می‌شود. مکانیسم کنترل جریان را باید بنا به محدودیت فضای بافرینگ بکار گرفت. بسته‌های موجود در مسیریاب ها را تنها در زمانی می‌توان ارسال کرد که فضای کافی در روتر فعلی وجود داشته باشد. در معماری مسیریاب پیشنهادی، مکانیسم کنترل جریان on/off پیاده‌سازی شده است که دلیل آن را می‌توان ناشی از سربار سخت‌افزاری پایین و سطح پایین سیگنال‌ها در مواردی خاص و آن‌هم در مقایسه با مکانیسم کنترل جریان مبتنی بر اعتبار دانست. تابع کنترل جریان، از واحد کنترل جریان و همراه با سیم‌های خاص در داخل روتر فعلی و یا سیم‌های متصل به روتر های مجاور استفاده می‌کند.***

***4. ارزیابی کارائی***

***4.1 تحلیل کارائیِ توان نوری و تلفات***

***فرض بر آن است که یک منبع لیزر برون تراشه‌ای می‌تواند منابع نوری ما را تأمین نماید. برای ایجاد یک بسته‌ی نوری و تکمیل ارتباطات، بسته باید از بعضی از دستگاه‌های نوری مانند موج برها و تشدید کننده‌های mirroring عبور نماید. در جدول 1، مقادیر تلفات نوری مربوطه نمایش داده شده است. با مقادیری که در جدول 1 مشاهده می‌شود، تلفات نوری در بین پورت‌های مختلف را می‌توان محاسبه کرد. نتایج شکل 3 در جدول 2 لیست شده است. با استفاده از نتایج موجود در جدول 2، کل تلفات درج در امتداد یک مسیر را می‌توان محاسبه کرد.***

***با توجه به اینکه معماریِ مسیریاب پیشنهادی، بر مبنای موج برها و تشدید کننده‌های microring می‌باشد، عبور از موج بر ضروری بوده و می‌تواند تلفات زیادی را به همراه داشته باشد. همان‌طور که در جدول 1 مشاهده می‌شود، تلفات موج بر در ادغام لایه‌ی برابر با 0.05Dn می‌باشد. با استفاده از این مقدار، می‌توان تلفات درج در بین پورت‌های مختلف در مکانیسم OCS را محاسبه نمود. حداقل مقدار این تلفات برابر با 0.1dB بوده در حالی که مقدار حداکثری آن می‌تواند به 0.7dB برسد. این نوع تلفات می‌تواند بخش زیادی از تلفات کل را به خود اختصاص دهد، البته در زمانی که بسته از طریق مسیرهایی طولانی ارسال شود. یک روش ممکن برای حذف تلفات انرژی نوری مربوط به موج برها این بوده که از دو لایه‌ی موج بر استفاده کنیم. اگرچه فرایند کوپل بین لایه‌ها به صورت ضعیف صورت می‌گیرد و این می‌تواند تلفات بالایی را به همراه داشته باشد. این متد را می‌توان با انتخاب ضخامت و مواد بین لایه‌ای به شکلی مناسب، مورد دسترسی قرار داد.***

******

***جدول 1: پارامترهای تلفات نوری [32]***

******

***جدول 2: تلفات درج در روتر پیشنهادی در یک مقیاس*** $5×5$

***علاوه بر این، توان نوری که می‌تواند به گیرنده‌ی هسته‌ی IP مقصد برسد، باید در بالای سطح آستانه نگه داشته شود (یعنی حساسیت گیرنده) تا این اطمینان داده شود که بسته به درستی دریافت می‌شود. بنابراین، انرژی لیزر باید بالای یک سطح حداقلی نگه داشته شده تا تلفات درج و حساسیت گیرنده مورد پوشش قرار گیرد. حداقل انرژی لیزر، وابسته به تلفات نوری در بدترین حالت در امتداد یک مسیر می‌باشد. بدترین حالت در زمانی رخ داده که بسته‌ی نوری از طولانی‌ترین مسیر در بین منبع و مقصد عبور کرده و منجر به تلفات حداکثری گردد. حداقل تلفات لیزر را می‌توان با استفاده از معادله‌ی زیر تخمین زد:***

******

***زمانی که*** $P\_{min-laser}^{dBm}$ ***برابر با تخمین حداقلی توان لیزر باشد،*** $P\_{receiver}^{dMb}$ ***برابر با حساسیت گیرنده بوده،*** $P\_{total-loss-1}^{dB}$ ***نیز برابر با تلفات درج کل در پیام در موج بر*** $λ\_{1}$ ***در امتداد مسیر ارتباطی بوده و*** $P\_{total-loss-2}^{DB}$ ***بیانگر کل تلفات درج پیام در موج بر*** $λ\_{2}$ ***در امتداد مسیر ارتباطی می‌باشد.***

***در این مقاله، حداقل انرژی لیزر را در شکل 4 نمایش داده‌ایم. در این شکل، مبانی معماری ONoC در مقیاس*** $8×8$ ***نمایش داده شده است. این معماری، متشکل از دو لایه، لایه‌ی هسته‌های IP و لایه‌ی اتصالات شبکه فوتونیک می‌باشد. لایه‌ی هسته‌های IP، متشکل از هسته‌های IP بوده و لایه‌ی فوتونیک نیز متشکل از روتر های پتیکی می‌باشد. چهار شرایط وجود دارد که در آن، یک پیام باید طولانی‌ترین مسیر در شکل 4 را طی کند: از (0، 0) به سمت (7،7)، از (0، 7) به سمت (7، 0) و از (7، 0) به سمت (0، 7). با استفاده از شبیه‌ساز شبکه‌ای OPNET[34]، به شبیه‌سازی تلفات درج، من جمله*** $p\_{total-loss-1}^{dB}$ ***و*** $p\_{total-loss-2}^{dB}$ ***پرداختیم و نتایج را در شکل 5 نشان دادیم. بدیهی است که حداقل مقدار*** $P\_{total-lost-1}^{dB }$ ***زمانی رخ داده که پیام از سمت (0، 0) به سمت (7، 7) منتقل شده و مقدار حداکثری*** $p\_{total-loss-2}^{dB}$ ***نیز زمانی رخ داده که پیام از سمت (0، 7) به سمت (7، 0) منتقل شود. این مقادیر به ترتیب برابر با 24.91 و 26.89 می‌باشد. فوتو دیتکتور های ژرمانیومی هر کدام دارای قابلیت پاسخ‌گویی 1 A/W بوده و مدارهای گیرنده هر کدام دارای حساسیت*** $-20dBm$ ***برای عملیات مبرا از خطا [32] می‌باشد که در آن، نسبت خطای بیتی (BER) کمتر از*** $10^{-12}$ ***می‌باشد. بنابراین حداقل تخمین توان برابر با 15.136Mw (بر اساس معادله‌ی 1) می‌باشد.***

******

***شکل 4: یک شبکه‌ی مش*** $8×8$ ***بر مبنای ONoC***

***4.2 کارائی شبکه***

***در این بخش، به ارزیابی کارائی در سطح شبکه‌ی مسیریاب پیشنهادی و آن‌هم در شبکه‌های مش*** $4×4$ ***و*** $8×8$ ***می‌پردازیم. گرایش هر دو شبکه یکسان می‌باشد و نتایج شبکه‌ی مش*** $8×8$ ***داده شده است. به منظور نمایش بهبود کارائی، دو معماری در یک مقیاس شبکه شبیه‌سازی شده است. شبیه‌سازی‌ها با استفاده از OPNET صورت می‌گیرد. فرکانس روتر الکتریکی بر این مفروض بوده که برابر با 1 گیگاهرتز می‌باشد که در NoC ها رایج می‌باشد. پهنای باند اتصالات نوری برابر با 12.5Gb/s می‌باشد [35] که می‌تواند به وسیله‌ی تشدید کننده‌ی مبتنی بر فناوری نانوفوتونیک ایجاد شود. با در نظر گرفتن بهره‌وری انرژی و نسبت ترافیک OPS، بافر الکتریکی به ازای هر پورت ورودی در روتر پیشنهادی بر این مفروض بوده که برابر با 64 بیت می‌باشد. بسته‌هایی که به داخل شبکه تزریق می‌شوند به مرور زمان از توزیع پوآسون تبعیت می‌کنند.***

***معماری‌ها بر حسب تأخیر انتها به انتها و توان عملیاتی و آن‌هم تحت نسبت تزریق بسته‌ها که بار پیشنهادی نام دارد، مورد ارزیابی قرار گرفته‌اند. تأخیر ETE، به عنوان میانگین تأخیری که یک بسته از سمت منبع به مقصد در شبکه متحمل می‌شود (شامل زمان تزریق، زمان انتشار، زمان پردازش و غیره) تعریف می‌شود. توان عملیاتی، برابر با تعداد بیت‌های بسته‌ی دریافتی به وسیله‌ی مقصد ارتباطی به ازای هر ثانیه می‌باشد.***

***ما کارائی این شبکه را با روتر پیشنهادی و آن‌هم در الگوهای ترافیکی یکنواخت و آن‌هم تحت فاکتورهای مختلف از ترافیک OCS مورد ارزیابی قرار داده‌ایم؛ برای مثال، نسبت‌های مختلف در ارتباط و طول بسته‌های نوری مختلف مورد ارزیابی قرار گرفته است. با توجه به نتایج شبیه‌سازی، می‌توان مشاهده کرد که شرایط مختلف دارای گرایش‌های مشابهی می‌باشند.***

***در شکل 6، تأثیر ETF و کارائی توان عملیاتی در معماری پیشنهادی را تحت نسبت‌های مختلف ترافیک OCS در الگوی ترافیکی یکنواخت مشاهده می‌کنید. طول بسته‌ی OCS برابر با 2048 بیت بوده و طول بسته‌ی نوری OPS نیز برابر با 32 بیت می‌باشد. می‌توان مشاهده کرد که گرایش‌ها به سمت تأخیر ETE و همچنین توان عملیاتی، تحت نسبت‌های مختلف یکسان می‌باشد، با این استثنا که مقادیر کمی تحت بار کاری پیشنهادی با هم تفاوت دارند. علاوه بر این، هر چه نسبت بالاتر باشد، تأخیر ETE بیشتر بوده و به توان عملیاتی کمتری دست پیدا می‌کنیم. این بدین دلیل بوده که ترافیک OCS در زمانی که نسبت بالاتر باشد، بیشتر بوده و زمان بیشتری برای انتقال بسته‌های نوری OCS نیاز می‌باشد.***

******

***شکل 5: تلفات کل طولانی‌ترین مسیرها***

******

***شکل 6: تأخیر ETF و کارائی توان عملیاتی در معماری پیشنهادی، تحت نسبت‌های مختلف ترافیک OCS***

***همچنین، کارائی معماری پیشنهادی را تحت بسته‌های نوری مختلف شبیه‌سازی نموده‌ایم و البته نسبت ترافیک OCS را برابر با 10% در نظر گرفته‌ایم. نتایج در شکل 7 نمایش داده شده است. می‌توان مشاهده کرد که گرایش‌ها تحت طول بسته‌های نوری مختلف در ترافیک OCS، مشابه می‌باشد، با این استثنا که تفاوت کمی در اندازه‌ی عددی تحت همان بار پیشنهادی وجود دارد. علاوه بر این، هر چه بسته طولانی‌تر باشد، تأخیر ETE بیشتر بوده و توان عملیاتی کمتر خواهد بود. دلیل آن نیز این بوده که زمان زیادی برای انتقال بسته‌های نوری OCS نیاز می‌باشد و این مسئله باعث شده تا بخش زیادی از تأخیر ETE را به خود اختصاص دهد.***

***ما معماری پیشنهادی را با یک شبکه‌ی سوئیچینگ مدار ترکیبی الکتریکی-نوری متعارف (با نام T-OCS به اختصار) و همچنین یک شبکه‌ی سوئیچینگ بسته‌ی نوری بر مبنای قرار دادی که بین الگوی نوری و الگوی الکتریکی در هر روتر وجود دارد (به اختصار با نام T-ops) مورد مقایسه قرار داده‌ایم. این معماری‌ها از الگوریتم مسیریابی XY استفاده می‌کنند.***

******

***شکل 7: تأخیر ETE و کارائی توان عملیاتی معماری پیشنهادی، تحت بسته‌های نوری مختلف به طول OCS***

******

***شکل 8: تأخیر ETE برای ترافیک یکنواخت. (b) توان عملیاتی برای ترافیک یکنواخت***

******

***شکل 9: (a) تأخیر ETE برای ترافیک مکمل بیت، (b) توان عملیاتی برای ترافیک مکمل بیت***

***سه بار ترافیکی ترکیبی را مورد ارزیابی قرار داده‌ایم [31]: یکنواخت، مکمل بیت و ترانهادن. فرض بر آن است که 10% از ارتباطات نیاز به OCS دارد و مابقی برای سرویس دهی OPS مورد استفاده قرار می‌گیرد. علاوه بر این، طول بسته‌ی نوری برابر با 2048 بیت در OCS بوده و این طول در OPS برابر با 32 بیت می‌باشد [36]. نتایج تأخیر ETE و توان عملیاتی نسبت به بار پیشنهادی، در شکل‌های 8 تا 10 نمایش داده شده است. مهم نیست که چه نوع خدماتی (هر کدام از دو معماری پیشنهادی) تنها از یک مکانیسم سوئیچینگ استفاده می‌کنند در حالی که معماری پیشنهادی می‌تواند به صورت موازی از OCS و OPS پشتیبانی کرده و به تأخیر کمتر و توان عملیاتی بالاتر دست پیدا کند. نتایج شبیه‌سازی در شکل 8 را به عنوان مثال در نظر بگیرید. در زمانی که بار پیشنهادی به مقدار 0.2 افزایش پیدا می‌کند، کارائی معماری پیشنهادی در سطح قابل ملاحظه‌ای کاهش پیدا می‌کند و تأخیر ETE نیز در سطح زیادی افزایش پیدا کرده و توان عملیاتی تقریباً ثابت خواهد ماند. این بدین دلیل بوده که شبکه دچار اشباع شده و بسته‌های بیشتری به داخل شبکه تزریق می‌شود. نقطه‌ای که از آن نقطه به بعد شاهد افت کارائی هستیم را نقطه‌ی اشباع گویند. البته نقاط اشباع مربوط به T-ocs و T-ops که کمتر از معماری پیشنهادی می‌باشند، به ترتیب برابر با 0.09 و 0.14 و آن‌هم در یک الگوی ترافیکی یکنواخت می‌باشند. در زمانی که بار پیشنهادی برابر با 0.07 باشد، تأخیر ETE در T-ocs و T-ops، به اندازه‌ی 5.42 برابر بیشتر و 20.15 برابر بیشتر از شبکه‌ی پیشنهادی می‌باشد. در زمانی که بار پیشنهادی برابر با 0.25 باشد، توان عملیاتی شبکه‌ی پیشنهادی، 2.52 برابر و 1.38 برابر بیشتر از T-ocs و T-ops می‌باشد. بنابراین می‌توان به این نتیجه رسید که کارائی شبکه‌ی پیشنهادی بهبود پیدا کرده است.***

***5. نتیجه‌گیری***

***در این مقاله به ارائه‌ی یک مسیریاب مدار بسته‌ی ترکیبی برای ONoC پرداختیم. مسیریاب پیشنهادی می‌تواند از مکانیسم سوئیچینگ ترکیبی بر حسب خدمات تضمینی و خدمات بهترین-کوشش پشتیبانی نماید. بکار گیری واحد کنترل OCS و واحد کنترل OPS می‌تواند به ما در هماهنگ‌سازی OCS و OPS در یک زمان و آن‌هم با بکار گیری فناوری WDM کمک کننده باشد. نقش بخش سوئیچینگ را می‌توان بر مبنای مثالی از یک کراس بار نوری*** $5×5$ ***تشریح نمود. مکانیسم سوئیچینگ ترکیبی، بر مبنای معماری پیشنهادی طراحی شده است. ما به تحلیل تلفات مسیریاب پیشنهادی در یک مقیاس*** $5×5$ ***پرداختیم و تلفات نوری اولیه را نیز در نظر گرفتیم. در همین راستا، حداقل انرژی لیزر را در شرایطی که از یک شبکه‌ی مش*** $8×8$ ***استفاده می‌شود، تحلیل نمودیم. علاوه بر این، کارائی معماری پیشنهادی را مورد ارزیابی قرار دادیم. نتایج شبیه‌سازی نشان می‌دهد که برای معماری پیشنهادی در الگوهای ترافیکی یکنواخت، هر چه نسبت ترافیک OCS بیشتر باشد، تأخیر ETE بیشتر خواهد بود و هر چه طول بسته‌ی ترافیک OCS بیشتر باشد، تأخیر ETE بیشتر خواهد بود و توان عملیاتی کمتر خواهد شد. علاوه بر این، در زمانی که معماری پیشنهادی را با دو معماری متعارف مقایسه نمودیم، توانستیم به بهترین کارائی همراه با تأخیر ETE و آن‌هم با توان عملیاتی بالا تحت سه بار ترافیکی مختلف دست پیدا کنیم: یکنواخت، مکمل بیت و ترانهاده. مسیریاب پیشنهادی می‌تواند دو خدمات مختلف را در نظر بگیرد. در آینده قصد داریم به مطالعه‌ی بافرهای نوری بپردازیم تا بتوان سرعت سوئیچینگ و همچنین متدهای بهینه‌سازی در معماری پیشنهادی را بهبود داد.***

1. Intellectual property [↑](#footnote-ref-1)
2. Network On Chip [↑](#footnote-ref-2)
3. شاخه ای از فیزیک نور و فناوری نانو بوده که به بررسی رفتار نور و بر هم کنش های بین نور و ماده در مقیاس نانو میپردازد. [↑](#footnote-ref-3)
4. On-chip services [↑](#footnote-ref-4)
5. Best-effort services [↑](#footnote-ref-5)
6. Integration intensity [↑](#footnote-ref-6)
7. Blocking problem [↑](#footnote-ref-7)
8. Multiprocessor systems-on-chips [↑](#footnote-ref-8)