

ارزیابی کارایی مقایسه‌ای الگوریتم‌های مسیریابی تحمل‌پذیر خطای چالاسانی - بوپانا و مبتنی بر نرم‌افزار

فرشاد صفایی	احمد خونساری	امیرحسین شنطیا
دانشگاه آزاد اسلامی واحد تهران شمال	دانشکده فنی دانشگاه تهران	دانشگاه آزاد اسلامی واحد تهران شمال
safaei@ipm.ir	ak@ipm.ir	shantia_amirhosein@computer.org

نمونه‌هایی از این قبیل سیستم‌ها عبارتند از: [۱] ASCI Red، شبیه ساز زمین [۲] و سوپر کامپیوتر Blue-Gene/L [۳]. پیشرفت فناوری، ساختار تراشه‌های امروزی را به سویی می‌برد که از تک هسته‌ای بودن خارج شده و به سوی چند هسته‌ای شدن به پیش می‌روند. در این گونه تراشه‌ها، هسته‌های پردازشی، واحدهای حافظه، هسته‌های DSP و FPGA می‌توانند در کنار یکدیگر قرار گرفته و تراشه واحدی را که دارای تمامی امکانات این قبیل هسته‌ها باشد، تشکیل دهند.

امروزه کامپیوترهای بزرگ موازی شامل تعدادی زیادی مؤلفه‌های مرتبط با یکدیگر (مانند پردازنده‌ها، پیوندهای ارتباطی و مسیریاب‌ها) هستند که ارتباط این‌ها با یکدیگر از طریق تبادل پیام‌ها بر روی شبکه میان ارتباطی و مقیاس پذیر انجام می‌پذیرد. اما فراهم ساختن کیفیت خدمات سرویس (QoS) تحت محدودیت‌ها و قیود کارایی به یکی از دغدغه‌های اصلی طراحی در این نوع سیستم‌ها تبدیل شده و در نتیجه، دستیابی به ارتباطات تحمل پذیر خطا در شبکه‌های ارتباطی به عامل بسیار مهمی در این گونه سیستم‌ها منجر گشته است. به راستی با وجود صدها و هزاران مؤلفه، ارتباطات غیر قابل اطمینان شده و افزون بر این، پیچیدگی طراحی‌ها و کاهش مقیاس ساخت فناوری مدارهای مجتمع سبب شده که شبکه‌های میان ارتباطی و مؤلفه‌های آن در معرض خرابی‌های فراوانی قرار داشته باشند که شناسایی و کشف آن‌ها با روش‌های مرسوم و متداول بسیار دشوار و تقریباً غیر ممکن می‌باشد. بدین ترتیب، این گونه شبکه‌ها- با توجه به خرابی‌های گذرا و دائمی هر مؤلفه- برای تداوم بدون وقفه در عملکردشان بایستی به مکانیزم‌هایی برای کنترل خطا مجهز شوند.

در سالیان اخیر، تقریباً تمامی روش‌ها و الگوریتم‌های به کار گرفته شده در سیستم‌های تحمل پذیر خطا برای مطالعه کارایی این قبیل سیستم‌ها تحت شرایط مختلف خرابی، به روش شبیه‌سازی توسل جسته‌اند [۴-۸]. لیکن، گزینه دیگری که به دلیل توانمندی و کارایی، ابزار سودمندی در تحلیل و ارزیابی کارایی سیستم‌های کامپیوتری به شمار می‌آید، مدل ریاضی تحلیلی است که به پژوهشگران در طراحی و تصمیم‌گیری برای بهبود سیستم‌ها یاری می‌رساند. در واقع مدل

چکیده: بسیاری از الگوریتم‌های مسیریابی تطبیقی برای غلبه بر محدودیت‌های کارایی مسیریابی قطعی در شبکه‌های ارتباطی پیشنهاد شده‌اند. اما، پیش از آن‌که چنین طرح‌های مسیریابی به شکل موفقیت‌آمیزی در کامپیوترهای عملی مشارکت داده شوند لازم است به فهم و درک روشنی از عواملی که کارایی آن‌ها را به شکل بالقوه‌ای تحت تأثیر قرار می‌دهند، دست یابیم. در گذشته الگوریتم‌های مسیریابی در شبکه‌های عاری از خطا به شکل گسترده‌ای بررسی و مطالعه شده‌اند. از طرفی هر قدر که اندازه شبکه افزایش می‌یابد، احتمال این‌که پردازنده‌ها و پیوندهای مرتبط با آن‌ها نیز دچار خرابی شوند افزایش خواهد یافت. بنابراین، طراحی و پیاده‌سازی الگوریتم‌های مسیریابی تحمل‌پذیر خطا که سبب می‌شوند پیام‌ها بتوانند- حتی با وجود مؤلفه‌های معیوب- کماکان به راه خویش ادامه دهند ضرورت پیدا می‌کند. گرچه بسیاری از الگوریتم‌های مسیریابی تحمل‌پذیر خطا برای شبکه‌های متداول کامپیوتری پیشنهاد شده‌اند، پژوهش‌های ناچیزی به بررسی، ارزیابی و مدل‌سازی آن‌ها پرداخته‌اند. با نظر به این واقعیت و در کوششی برای پُر ساختن این فاصله، در مقاله جاری تحلیل‌های مقایسه‌ای جامعی برای ارزیابی کارایی نسبی دو طرح شناخته شده مسیریابی تحمل‌پذیر خطا یعنی روش مبتنی بر نرم‌افزار و چالاسانی- بوپانا با مشارکت الگوریتم‌های مسیریابی تطبیقی دو اتو و کاملاً تطبیقی در شرایط مختلف کاری شبکه عرضه شده‌اند. این گونه تحلیل‌ها از آن‌رو سودمندند که می‌توانند ابزار مؤثر و کارآمد با هزینه‌ای را که غالباً به زمان محاسباتی بسیار کمتری در مقایسه با آزمون‌های شبیه‌سازی نیازمندند، تدارک بینند.

کلمات کلیدی: تحمل‌پذیری خطا، شبکه‌های میان ارتباطی، ارزیابی کارایی، مسیریابی تطبیقی، طرح مسیریابی چالاسانی- بوپانا و طرح مسیریابی مبتنی بر نرم‌افزار.

۱- مقدمه

کاربردهای بسیاری در جهان واقعی، در علوم و مهندسی گرایش مشخصی را به سوی کامپیوترهایی با مقیاس بزرگ نشان می‌دهند.

درده است ۱۱۱۱. از آنجا که پیام‌های بلوکه شده در چندین مسیر یاب شبکه گسترده‌اند، اثرات خرابی‌ها می‌تواند به سرعت از طریق مسیر یاب‌ها و دیگر پیام‌ها در شبکه انتشار یابد. اصولاً ترمیم خرابی‌ها از نظر منابع و زمان بسیار هزینه‌بر است و معمولاً الگوریتم‌های مسیر یابی از مشارکت ویژگی عاری از بن بست بودن (deadlock-free) به جای ترمیم بن بست (deadlock recovery) استفاده می‌کنند.

ایده اصلی در این نوع شبکه‌ها دور زدن ناحیه خطا (misroute) است و این امر خود ممکن است به بروز وابستگی‌های کانالی (channel dependencies) بینجامد. طراحی الگوریتم‌های تحمل‌پذیر خطا در این روش سوئیچینگ بسیار دشوارتر و به شکل و الگوی خرابی و همچنین الگوریتم مسیر یابی پایه (قطعی یا تطبیقی) بسیار وابسته می‌باشد. البته این نوع روش‌ها نوعاً از افزودن منابعی مانند کانال‌های مجازی (virtual channel) استفاده می‌کنند و بدین ترتیب تصمیم‌گیری‌های مسیره‌ی را محدود می‌سازند.

ساختار الگوریتم‌های مسیر یابی تحمل‌پذیر خطا دنباله‌ای طبیعی از انواع خرابی‌هایی است که ممکن است روی دهند و توانایی ما برای شناسایی و کشف آن‌ها می‌باشد. الگوهای مؤلفه‌های خرابی و انتظارات ما درباره رفتار پردازنده‌ها و مسیر یاب‌ها در حضور چنین مؤلفه‌های خرابی، تعیین کننده راه کارهایی است که به کمک آن‌ها می‌توانیم قابلیت‌های عاری بودن از بن بست و سرگردانی (livelock) را در این نوع شبکه‌ها محتمل سازیم. به چنین اطلاعاتی مدل خرابی (fault model) گفته می‌شود. ادبیات محاسبات تحمل‌پذیر خطا، دامنه‌ای بس گسترده دارد و از ابتدا تا به انتها به تعریف مدل‌های خرابی برای رفتار سیستم‌های دیجیتال معیوب می‌پردازد. در این مقاله ما بر مدل خرابی بلوکی (block fault) متمرکز خواهیم شد. دلایل بسیاری برای بررسی خرابی‌های بلوکی وجود دارند. نخست این که آن‌ها می‌توانند چندین سناریوی معمول خرابی را هم‌چون خرابی گره‌ها و پیوندهای مستقل و نیز گره‌های معیوب متوالی در یک سطر یا ستون مدل کنند. دوم و مهم‌تر این که، می‌توان هر شکل دلخواه خرابی را، با برچسب زنی برخی پردازنده‌ها/گره‌ها به‌عنوان معیوب، به مانند یک خرابی بلوکی نگریست و آن را مدل کرد [۴، ۶، ۹ و ۱۰]. و بالاخره این که، خرابی بلوکی را می‌توان برای مدل‌سازی خرابی‌های موجود در تراشه، واحدهای چندتراشه‌ای و خرابی‌های سطح بُرد در شبکه‌هایی با ساختارهای مشبک (grid)، به‌ویژه در هم‌بندی‌های توری (mesh) و توری مدور به‌کار گرفت.

۲-۱. الگوریتم مسیر یابی تحمل‌پذیر خطای مبتنی بر نرم‌افزار

افزودن کانال‌های مجازی و مجبور ساختن تصمیم‌گیری‌های مسیر یابی بین آن‌ها می‌تواند به نحو مؤثری طراحی و پیاده‌سازی الگوریتم‌های تحمل‌پذیر خطا را تحت تأثیر قرار دهد. همان‌طور که گفته شد،

رفتار سیستم‌ها دارد. این قوانین به شکل روابط ریاضی بیان می‌شوند و در بردارنده پارامترها و متغیرهای مهمی از سیستم‌ها هستند. مدل‌های تحلیلی الگوریتم‌های مسیر یابی بدون خطا در گذشته به شکل گسترده‌ای بررسی شده‌اند، اما پژوهش‌های ناچیزی به ارزیابی مدل‌های کارآیی الگوریتم‌های تحمل‌پذیر خطا اختصاص یافته است. با انگیزش ناشی از ملاحظات فوق و در نظر گرفتن این حقیقت که خرابی پدیده‌ای گریز ناپذیر در سیستم‌های واقعی است؛ کوشش ما بر این بوده که از مدل‌های تحلیلی جدید ارائه شده [۹ و ۱۰] برای تعدادی از شناخته‌شده‌ترین الگوریتم‌های مسیر یابی تحمل‌پذیر خطا در سیستم‌های کامپیوتری استفاده کنیم تا به درک روشن و صحیحی از رفتار این گونه سیستم‌ها تحت شرایط مختلف خرابی نائل آئیم. برای از عهده برآمدن چنین مسأله‌ای، این مقاله مزایای نسبی کارآیی دو طرح شناخته شده مسیر یابی تحمل‌پذیر خطا، یعنی الگوریتم مبتنی بر نرم‌افزار [۷ و ۸] و طرح مسیر یابی چالاسانی-بوپانا [۴] را به کمک مدل‌های تحلیلی که قبلاً توسعه داده شده‌اند [۹ و ۱۰] تحت شرایط مختلف کاری شبکه مقایسه می‌کند.

ادامه مقاله به شرح زیر ساماندهی شده است. بخش ۲ به بررسی و تعاریف مفاهیم اولیه کنترل خطا در شبکه‌های میان‌ارتباطی پرداخته و دو طرح مسیر یابی تحمل‌پذیر خطا مورد نظر را به اختصار مرور می‌کند. بخش ۳ الگوریتم مسیر یابی چالاسانی-بوپانا را با الگوریتم مسیر یابی مبتنی بر نرم‌افزار برای الگوهای خرابی مستطیل شکل (rectangular fault pattern) در دو حالت با و بدون هم‌پوشانی و تحت شرایط مختلف کاری در شبکه‌های توری مدور (torus) دو بُعدی مقایسه می‌کند. و سرانجام، بخش ۴ این مطالعه را نتیجه‌گیری کرده و به پایان می‌برد.

۲-۲. مسیر یابی تحمل‌پذیر خطا

الگوریتم‌های تحمل‌پذیر خطا، تکنیک‌هایی را برای تضمین تحویل پیام‌ها با وجود مؤلفه‌های معیوب در شبکه، تدارک می‌بینند. هدف اصلی از طراحی الگوریتم‌های مسیر یابی تحمل‌پذیر خطا، پیشینه ساختن توانایی گره‌های فعال یک شبکه برای ارتباط با دیگر گره‌ها، با فرض وجود گره‌ها و کانال‌های معیوب، است؛ چرا که از نظر ایدآل، تمامی گره‌های فعال باید- بدون توجه به مدل، نوع، الگو، مکان و تعداد خرابی‌ها- قادر به ارتباط با یکدیگر باشند. بنابراین، الگوریتمی دارای ویژگی تحمل‌پذیری خطا است که بتواند تضمین دهد هر پیامی را در هر شرایطی، حتی در هنگام مواجهه با تعدادی گره یا پیوند ارتباطی معیوب، به درستی به مقصدش تحویل خواهد داد.

استفاده از بافرهای کوچک و سرعت مسیر یاب‌هایی که از سوئیچینگ خزشی (wormhole switching) استفاده می‌کنند، این روش سوئیچینگ را به عرصه چالش‌برانگیز منحصر به فردی برای

طراحی مسیریابها ساده شده و سرعت الگوریتمهای تحمل پذیر حط افزایش یابد. بدین ترتیب، به نظر میرسد که این الگوریتم می تواند برای مشارکت در طراحی نسل بعدی مسیریابها کاندیدای مناسبی باشد.

۲-۲. الگوریتم مسیریابی تحمل پذیر خطای چالاسانی - بوپانا

از نظر مفهومی، نواحی خرابی را می توان هم چون جزیره ای از خرابی ها در دریایی از گره ها و کانال های ارتباطی نگریست. همان طور که کشتی حول جزیره هدایت می شود، مسیره ای یک پیام حول نواحی خرابی کاری شدنی است. چالاسانی و بوپانا [۴] روش کارآمدی را به منظور بهبود بخشیدن به سوئیچینگ خزشی برای مسیریابی های تحمل پذیر خطا و عاری از بُن بست در شبکه های توری مدور پیشنهاد کرده اند. آن ها بلوک های خرابی با مکانی اختیاری را که تنها از دانش محلی درباره خرابی ها استفاده می کند در نظر داشته اند. هنگامی که خرابی ای وجود ندارد، پیامها از طریق کوتاه ترین مسیر، هدایت می شوند و این محدودیت برای سهولت مسیریابی در حضور خرابی ها کمی تخفیف می یابد. مفهوم کلیدی در کار آن ها این است که برای هر ناحیه خرابی متصل در شبکه، امکان اتصال مؤلفه های سالم حول ناحیه خرابی برای تشکیل یک حلقه وجود دارد. چنین حلقه خرابی را f-ring برای آن ناحیه خرابی می گویند. هر f-ring از مجموعه ای از گره ها و کانال های فیزیکی سالم که به شکل سطری (row-wise)، ستونی (column-wise) یا قطری (diagonally) در همسایگی یک یا چند مؤلفه ناحیه خرابی هستند تشکیل می شود. f-ring هر خرابی بلوکی، شکلی مستطیلی دارد.

تعریف ۱ [۴]: f-ring مجموعه ای از همگی گره ها و کانال های همسایه سالمی است که همیشه می توانند حول یک ناحیه خرابی مستطیل شکل تشکیل شوند؛ به طوری که درون f-ring تنها شامل مؤلفه های خرابی باشد.

تعریف ۲ [۴]: دو f-ring را در صورتی هم پوش (overlap) گویند که در یک یا چند پیوند ارتباطی مشترک باشند.

f-ring ها، مسیرهای مختلفی را برای پیامهایی که توسط خرابی ها مسدود شده اند به وجود می آورند و برای مسیره ای پیامها حول نواحی خرابی به کار برده می شوند. هر f-ring نشان دهنده مسیری دو طرفه برای پیامی است که به گذر از ناحیه خرابی محاط شده توسط f-ring نیازمند می باشد. بدین ترتیب، هر f-ring برای مسیره ای پیامها در دو بُعد، چهار راهی را به ذهن تداعی می کند. بسته به اندازه ناحیه خرابی، کانال های فیزیکی هر f-ring ممکن است در مقایسه با دیگر کانال های فیزیکی سالم، حجم بیشتری از ترافیک را عبور دهند. علاوه بر این، مسیره ای پیامها حول یک یا چند f-ring احتمالات بیشتری را برای وقوع بن بست پدید می آورد. از این رو، الگوریتم های مسیریابی با

پذیرش از میان رفتن نظم در شبکه است نه خود به پیچیدگی مسیریابها و افزایش هزینه ها منجر خواهد شد. چنانچه نرخ خطا ناچیز باشد، استفاده از مسیریابهایی با ویژگی تحمل پذیر خطا غالباً توجیه پذیر نخواهد بود. اغلب مسیریابهای تجاری، سریع، فشرده و قطعی هستند و از نظر ایدآل انتظار داریم که این ویژگی ها در آن ها ثابت باقی بمانند. به همین دلیل، یک راهکار مبتنی بر نرم افزار [۷] برای مسیریابی تحمل پذیر خطا در شبکه هایی با سوئیچینگ خزشی به شکل قطعی مطرح و بعدها نسخه دیگری از این الگوریتم [۸] ارائه شد که ویژگی مسیریابی تطبیقی نیز به آن افزوده شد.

مزیت روش های مسیریابی مبتنی بر نرم افزار آن است که از اصلاحات پرهزینه در کنترل جریان مسیریابی و اعمال محدودیت های مسیره ای پرهیز می کنند. ارتباطات تحمل پذیر خطا نیازمند آن هستند که شبکه به شکل پویا قادر به مسیره ای پیامها در طول مسیرهای غیر بهینه باشد. تکنیک های ارائه شده در این روش با چندین نگرش و ملاحظه بررسی شده اند. نخست این که آن ها با محیط هایی مرتبطند که نرخ بروز خطا بسیار پایین است. از سویی، در بسیاری از سیستمها احتمال بروز دومین و سومین خطا پیش از تعمیر خطای اول ناچیز می باشد و در طی این زمان آرزومندیم تا ماشین بدون این که در کارآیی ارتباطی اش تنزل و خللی پدید آید به عملکرد صحیح خویش تداوم بخشد. هم چنین می خواهیم که ویژگی های طراحی مسیریابهای موجود (یعنی سرعت و فشرده گی) حفظ گردد و بالاخره می خواهیم تا حالتی عمومی و سریعی را پدید آوریم تا پیامهایی که با خرابی ها مواجه نمی شوند به شکل کمینه ای مسیره ای گردند. در این گونه موارد، ترجیحاً از الگوریتم های مسیریابی مبتنی بر نرم افزار استفاده می شود. به این صورت که مسیریابی عادی برای اکثر پیامها با کارآیی زیادی انجام می شود اما چنانچه پیامی با ناحیه خطادار مواجه گردد، تأخیر زیادی را متحمل خواهد شد زیرا این پیام باید برای تصمیم گیری به لایه های بالاتر ارسال گردد. فلسفه الگوریتم مسیریابی مبتنی بر نرم افزار ساده است. هنگامی که پیامی با خطا مواجه می شود، رُوبه زیر انجام می پذیرد:

۱. از شبکه حذف می شود یا اصطلاحاً توسط مسیریاب محلی جذب می شود.

۲. پیام به لایه مبادله پیام ارسال می گردد.

۳. نرم افزار مربوطه یکی از تصمیم های زیر را اتخاذ می کند:

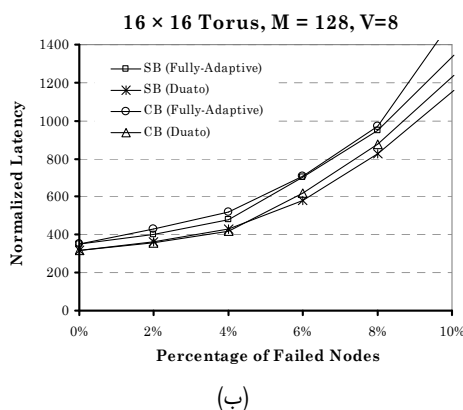
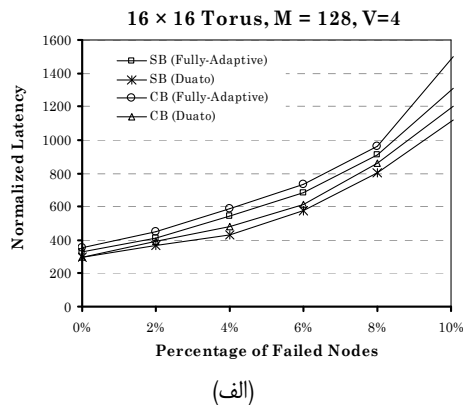
- سرآیند پیام را تغییر می دهد به گونه ای که پیام از یک مسیر قطعی دیگر به حرکت خویش ادامه دهد.
- آدرس یک گره میانی را انتخاب کرده و پیام را به سوی آن گسیل می دارد.

۴. پیام را دوباره به شبکه تزریق می کند.

در این الگوریتم، مقوله های بُن بست، سرگردانی و کارآیی بررسی و ثابت شده که با داشتن تعداد محدودی خرابی، الگوریتم فاقد بُن بست و

نرافید اشتباعتی است که سبب می‌شود شبکه به وضعیت اشتباعت وارد گردد. به همین دلیل، مدل‌های تحلیلی توسعه داده شده در [۹ و ۱۰] می‌توانند برای پیش‌بینی بیشینه توان عملیاتی به دست آمده توسط الگوریتم‌های مسیریابی مزبور به آسانی مورد استفاده قرار بگیرند. ما کارایی شبکه را برای شبکه توری مدور به ابعاد 16×16 ، طول پیام ۱۲۸ فلیت، تعداد ۴ و ۸ کانال مجازی و نرخ‌های خرابی ۲٪ تا ۱۰٪ برای خرابی‌هایی از نوع بلوکی در دو حالت با و بدون هم‌پوشانی بررسی کرده‌ایم. در ادامه این بخش، ما معیارهای کارایی طرح‌های مسیریابی تحمل‌پذیر خطای چالاسانی - بوپانا و مبتنی بر نرم‌افزار را با مشارکت دو الگوریتم مسیریابی تطبیقی یعنی روش دوآتو و روش مسیریابی کاملاً تطبیقی مقایسه خواهیم کرد.

شکل ۱ نتایج میانگین تأخیر نرمال شده را در یک شبکه توری مدور 16×16 ، هنگامی که طول پیام ۱۲۸ فلیت، تعداد کانال‌های مجازی در کانال فیزیکی ۴ و ۸ و نرخ‌های خرابی برای خرابی‌هایی از نوع بلوکی با و بدون هم‌پوشانی از ۲٪ تا ۱۰٪ تغییر می‌کند، نشان داده است.



شکل ۱: میانگین تأخیر پیام نرمال شده برای طرح‌های مسیریابی چالاسانی - بوپانا (CB) و مبتنی بر نرم‌افزار (SB) با مشارکت الگوریتم‌های کاملاً تطبیقی و دوآتو در یک شبکه توری مدور 16×16 با $V = 4, 8$ کانال مجازی در هر کانال فیزیکی و نوع خرابی بلوکی (الف) غیرهم‌پوش و (ب) هم‌پوش با نرخ‌های خرابی صفر تا ۱۰٪.

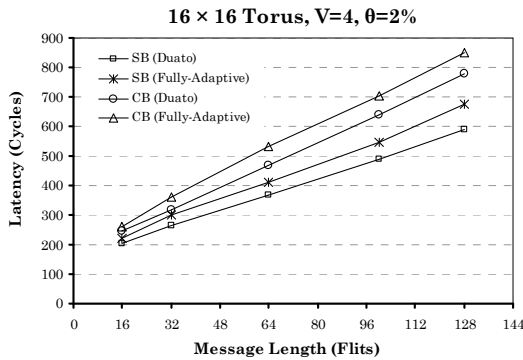
بن‌بست‌های ناشی از خرابی‌ها سر و سر داشته باشند. هنگامی که خرابی روی می‌دهد، f-ring می‌تواند حول آن خرابی با استفاده از یک رویه دو مرحله‌ای تشکیل گردد. در گام اول، هر پردازنده‌ای که پیوند خرابی را شناسایی کرده است، این پیام را برای همسایه‌هایش در ابعاد دیگر ارسال می‌کند. در گام دوم، بر اساس مجموعه‌ای از پیام‌های دریافتی، هر گره‌ای که بناست بر روی f-ring باشد، همسایه‌هایش را در f-ring تعیین می‌کند. یعنی هر گره‌ای که دارای پیوندی معیوب است و یک یا چند پیام وضعیت را دریافت کرده، موقعیت خویش را بر روی f-ring مشخص می‌سازد. برای آگاهی از جزئیات بیشتر می‌توان به [۴] مراجعه کرد. چالاسانی و بوپانا نشان داده‌اند که برای هر الگوریتم مسیریابی کاملاً تطبیقی، با نرخ خرابی ۱۰٪ می‌توان به کارایی مناسبی دست یافت و بدین منظور حداکثر به چهار کانال مجازی اضافی نیاز خواهد بود. در این مقاله ما از الگوریتم‌های مسیریابی دوآتو [۱۱ و ۱۲] و کاملاً تطبیقی [۱۱] که در اصل برای شبکه‌های عاری از خطا معرفی شده‌اند استفاده کرده و آن‌ها با دو طرح مسیریابی تحمل‌پذیر خطای چالاسانی - بوپانا و مبتنی بر نرم‌افزار مشارکت خواهیم داد.

۳- مقایسه کارایی طرح‌های مسیریابی تحمل‌پذیر

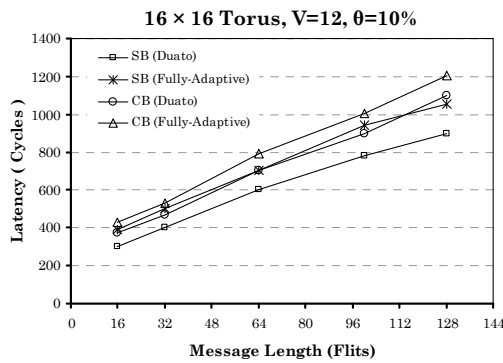
خطای چالاسانی - بوپانا و مبتنی بر نرم‌افزار

در این بخش، ما معیارهای کارایی الگوریتم‌های مسیریابی تحمل‌پذیر خطای چالاسانی - بوپانا و الگوریتم مسیریابی مبتنی بر نرم‌افزار را برای یک شبکه توری مدور دو بُعدی تحت شرایط مختلف کاری با یکدیگر مقایسه خواهیم کرد. نتایج به دست آمده در این بخش هنگامی که ابعاد بزرگتری از شبکه یا هم‌بندی‌های دیگری مورد بررسی قرار گیرند، چندان تغییر نخواهد کرد. معیار اصلی به کار رفته برای این مجموعه از نتایج عبارتست از میانگین تأخیر پیام (mean message latency)، که میانگین زمان مورد نیاز برای یک پیام در گذر از مبدأ به مقصد می‌باشد. این کمیت خود از میانگین تأخیر شبکه یعنی زمان لازم برای عبور از شبکه و میانگین زمان انتظار دیده شده توسط پیام در گره مبدأ، تشکیل شده است. از مدل‌های تحلیلی توسعه داده شده در [۹ و ۱۰] برای ارزیابی پارامترهای مورد نظر در شبکه مفروض استفاده می‌شود. ما همچنین درباره تأثیر طول پیام، نرخ خرابی‌ها و تعداد کانال‌های مجازی استفاده شده در کانال ورودی پردازش‌گر (injection channel) در گره مبدأ بر توان عملیاتی شبکه (throughput) صحبت خواهیم کرد. توان عملیاتی که بیانگر ظرفیت حمل بار در شبکه است، بیشینه تعداد پیام‌های تحویل داده شده توسط شبکه در واحد زمان می‌باشد [۶ و ۱۱]. بیشینه توان عملیاتی به دست آمده توسط شبکه‌ای که نزدیک به اشتباعت کار می‌کند می‌تواند از آن رو مورد توجه قرار گیرد که در حالت پایدار، توان عملیاتی همواره برابر ترافیک تزریق شده به شبکه است که در آن پیامی از میان

یکی از عواملی که به چنین مشاهده‌ای منجر می‌شود، نوسایی بهتر طرح مسیریابی مبتنی بر نرم‌افزار در حذف پیام‌های مواجه شده با خرابی و پاک‌سازی و تخلیه شبکه برای مسیره‌دهی دیگر پیام‌ها است.



(الف)



(ب)

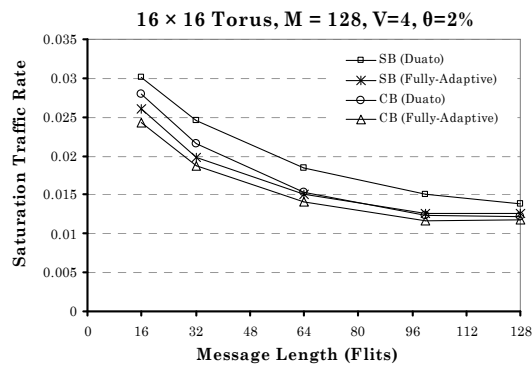
شکل ۲: تأخیر بر حسب طول پیام هنگام اعمال ترافیک اشباع برای طرح‌های مسیریابی چالاسانی-بوپانا (CB) و مبتنی بر نرم‌افزار (SB) با مشارکت الگوریتم‌های کاملاً تطبیقی و دواتو در یک شبکه توری مدور ۱۶×۱۶ با $V=4, 12$ کانال مجازی در هر کانال فیزیکی و نوع خرابی بلوکی (الف) غیر هم‌پوش و (ب) هم‌پوش با نرخ‌های خرابی $\theta = 2\%, 10\%$

شکل ۳: توان عملیاتی نرمال شده را بر حسب نرخ‌های مختلف خرابی از ۰٪ تا ۱۰٪ در شبکه مزبور نمایش داده است. همان‌طور که می‌بینیم، هر قدر به درصد خرابی‌ها افزوده می‌شود توان عملیاتی نرمال نیز افت تدریجی پیدا می‌کند. از مقایسه حالات بدون خطا با حالات خطای ۱۰٪ درمی‌یابیم که طرح مسیریابی مبتنی بر نرم‌افزار (مشخص شده با SB) با مشارکت الگوریتم دواتو شاهد کاهش ۳۵٪ در پارامتر توان عملیاتی بوده است. در حالی که طرح مسیریابی چالاسانی-بوپانا (مشخص شده با CB)، کاهش به میزان ۵۵٪ داشته است. بنابراین، طرح مسیریابی مبتنی بر نرم‌افزار تنزلی مطبوع در کارایی را با حضور مؤلفه‌های خرابی از خویش به نمایش گذاشته است. در این طرح مسیریابی، به دلیل بهره‌گیری از مدیریت منظم کانال‌های مجازی، بار

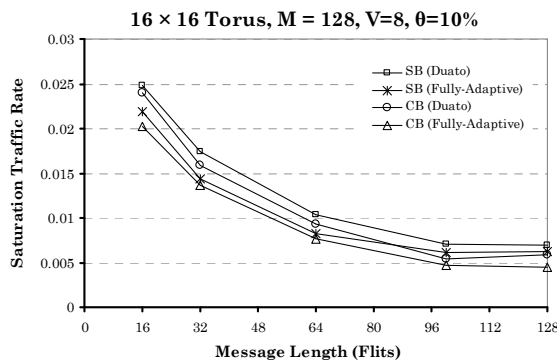
برای دیدن منزل دارایی در کیفیت نار شبیه در حضور خرابی‌ها، الگوریتم‌های مسیریابی را برای شبکه عاری از خرابی شبیه‌سازی کرده‌ایم. سربار تأخیر برای هر دو روش مسیریابی برابر صفر در نظر گرفته شده است [۹ و ۱۰]. برای درک بیشتر، از دو روش مسیریابی کاملاً تطبیقی و دواتو همراه با این طرح‌های مسیریابی استفاده شده است. کارایی مقایسه‌ای در طول مجموعه‌های مختلف خرابی کاملاً مشهود است. بنابراین، ما مجموعه مختلفی از خرابی‌ها را برای ۱۰٪ بار ترافیکی آزمون کرده‌ایم. مقادیر فراهم آمده از این مجموعه‌های مختلف متوسط‌گیری شده و در شکل ۱ به نمایش درآمده است. محور افقی در این گراف‌ها نشان‌دهنده نرخ ترافیک تزریق شده توسط هر گره در شبکه است در حالی که محور عمودی میانگین تأخیر پیام را بر حسب سیکل نشان می‌دهد؛ به طوری که هر سیکل برابر زمان لازم برای انتقال یک فلیت در طول یک کانال فیزیکی می‌باشد.

همان‌طور که می‌بینیم هر اندازه درصد خرابی‌ها افزایش می‌یابد، به میزان تأخیر پیام‌ها نیز افزوده می‌گردد. نتایج به دست آمده حاکی از آنند که طرح مسیریابی مبتنی بر نرم‌افزار با مشارکت دو الگوریتم دواتو و کاملاً تطبیقی، تقریباً در همگی حالات به دلیل استفاده از منابع بیشتر تأخیرهای انسداد کمتری را در مسیریاب‌های میانی نتیجه می‌دهد. شکل ۱ هم‌چنین نشان می‌دهد که در صورت به‌کارگیری الگوریتم مسیریابی مبتنی بر نرم‌افزار، شبکه کماکان توان عملیاتی بیشتری را حمل خواهد کرد. این به دلیل آن است که در طرح مسیریابی مبتنی بر نرم‌افزار، پیام‌های مواجه شده با خرابی‌ها همواره از شبکه جمع‌آوری شده و در نتیجه تعداد پیام‌های موجود در شبکه کاهش خواهد یافت. در عوض، در صورت به‌کارگیری دو الگوریتم مسیریابی فوق با طرح چالاسانی-بوپانا، پیام‌های مواجه شده با خرابی‌ها همیشه در داخل شبکه باقی می‌مانند و منابع قابل ملاحظه‌ای از شبکه را - حتی با وجود آن‌که پیام‌ها قادر به استفاده از این منابع برای پیش‌روی به سوی مقصدشان نباشند- اشغال خواهند کرد که به احتمال انسداد بیشتر پیام‌ها و در نتیجه افزایش تأخیر منجر خواهد شد.

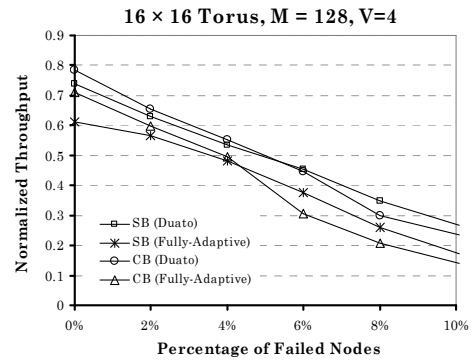
شکل ۲ نیز به ترتیب تأخیر پیام‌ها را در برابر طول پیام هنگامی که شبکه درست در آستانه ورود به نرخ ترافیک اشباع خویش است (یعنی حاصل ضرب ترافیک ورودی و زمان سرویس کانال در مدل تحلیلی [۹-۱۱] بزرگتر یا مساوی یک می‌باشد). برای خرابی‌های بلوکی با و بدون هم‌پوشانی در نرخ‌های خرابی ۲٪ و ۱۰٪ نشان می‌دهد. همان‌طور که می‌بینیم، هر قدر که طول پیام افزایش می‌یابد یک روند کارایی تقریباً خطی برای هر دو طرح مسیریابی به چشم می‌خورد. افزون بر این، برای طول مشخصی از پیام، تأخیر طرح مسیریابی چالاسانی-بوپانا از روش مبتنی بر نرم‌افزار بیشتر است و باید دانست که طرح مسیریابی مبتنی بر نرم‌افزار در این حالت اجازه



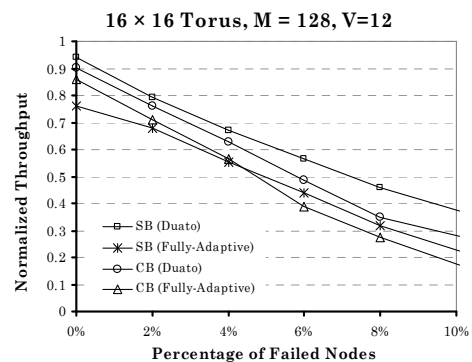
(الف)



(ب)



(الف)



(ب)

شکل ۴: بیشینه توان عملیاتی در برابر طول پیام برای طرح‌های مسیریابی چالاسانی- بوپانا (CB) و مبتنی بر نرم‌افزار (SB) با مشارکت الگوریتم‌های کاملاً تطبیقی و دوآتو در یک شبکه توری مدور 16×16 با طول پیام $M=128$ فلیت، تعداد $V=4, 8$ کانال مجازی در هر کانال فیزیکی و نوع خرابی بلوکی (الف) غیر هم‌پوش و (ب) هم‌پوش با نرخ‌های خرابی $\theta = 2\%, 10\%$

علاوه بر این، شکل ۴ نشان می‌دهد که افزایش تعداد کانال‌های مجازی از ۴ تا ۸، اختلاف در نرخ ترافیک اشباع را از ۲۱٪ به ۰/۹٪ کاهش خواهد داد. این مسأله گواه آن است هنگامی که تعداد کانال‌های مجازی افزایش یابد، اگرچه شبکه می‌تواند از نرخ ترافیک بیشتری پشتیبانی کند، اختلاف میان نقاط اشباع الگوریتم‌ها کاهش یافته و یک کارایی مقایسه‌ای فراهم خواهد شد. زیرا هنگامی که تعداد کانال‌های مجازی افزایش می‌یابد، پیام‌ها با احتمال کمتری دچار انسداد شده و در نتیجه به کارایی بیشتری در شبکه دست خواهیم یافت. افزون بر این، افزایش در تعداد کانال‌های مجازی به بیش از ۲۰ عدد به تحصیل کارایی قابل ملاحظه‌ای منجر نخواهد شد. این امر به دلیل آن است که شبکه به کران واقعی تحمیل شده به وسیله پهنای باند کانال‌های فیزیکی خود نزدیک می‌شود و در نتیجه همگی الگوریتم‌های مسیریابی رفتار مشابهی را از خویش به نمایش می‌گذارند. این یافته‌ها با نتایج به دست آمده در بررسی‌ها و مطالعات موجود به وسیله شبیه‌سازی‌های نرم‌افزاری نیز سازگاری دارد [۴-۸ و ۱۲].

شکل ۳: مقایسه میان توان عملیاتی نرمال شده در مقابل درصد خرابی‌های گره برای طرح‌های مسیریابی چالاسانی- بوپانا (CB) و مبتنی بر نرم‌افزار (SB) با مشارکت الگوریتم‌های کاملاً تطبیقی و دوآتو در یک شبکه توری مدور 16×16 با طول پیام $M=128$ فلیت، تعداد $V=4, 12$ کانال مجازی در هر کانال فیزیکی و نوع خرابی بلوکی (الف) غیر هم‌پوش و (ب) هم‌پوش با نرخ‌های خرابی صفر تا ۱۰٪.

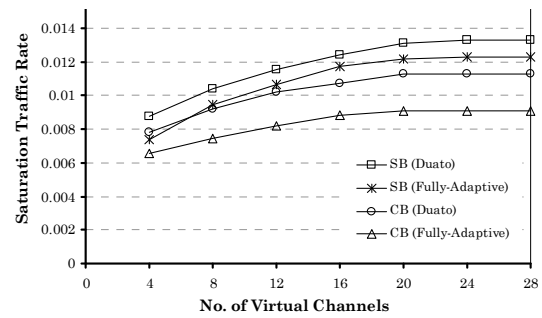
شکل ۴ نرخ ترافیک اشباع را به عنوان تابعی از طول پیام در شبکه توری مدور با مشخصات بیان شده در بالا نشان می‌دهد. این شکل بیان می‌کند که طرح مسیریابی مبتنی بر نرم‌افزار با مشارکت الگوریتم دوآتو می‌تواند بار ترافیکی بیشتری را، در حدود ۲۸٪ و ۳۰٪ به ترتیب در مقایسه با طرح مسیریابی چالاسانی- بوپانا به دست آورد. یکی از عوامل اصلی که به چنین مشاهده‌ای مربوط می‌شود توانایی بهتر طرح مسیریابی مبتنی بر نرم‌افزار در گردآوری و حذف پیام‌های مواجه شده با خرابی‌ها از شبکه و پاک‌سازی شبکه برای مسیردهی هرچه بهتر پیام‌های دیگر می‌باشد.

شکل ۵: نرخ ترافیک اشباع را هنگامی که تعداد کانال‌های مجازی در این دو طرح مسیریابی تغییر پیدا می‌کند، برای نرخ‌های خرابی ۲٪ و ۱۰٪ در دو حالت با و بدون هم‌پوشانی به تصویر کشیده است. نرخ‌های ترافیک اشباع برای مسیریابی مبتنی بر نرم‌افزار و

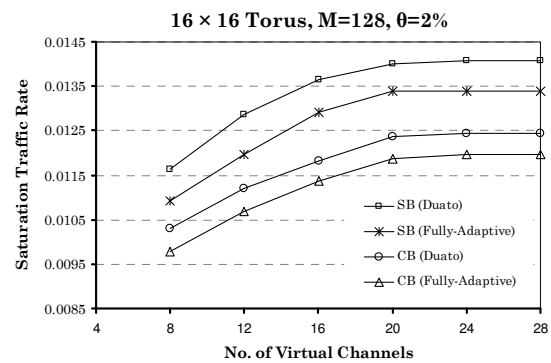
داده، صوت، ویدئو و تصویر در دامپونرهای موازی، دامپونرهای توزیعی و سیستم‌های ارتباطات دور که ارتباطات کارآمد در آن‌ها به هم‌زمانی، توان عملیاتی بالا و تأخیر اندکی نیازمند است، مورد استفاده قرار بگیرد.

شکل ۶ توان شبکه را برای طرح‌های مسیریابی مبتنی بر نرم‌افزار و چالاسانی- بوپانا با مشارکت الگوریتم‌های مسیریابی دوآتو و کاملاً تطبیقی در شبکه توری مدور 16×16 با طول پیام ۱۲۸ فلیت، تعداد ۴ و ۸ کانال مجازی در کانال فیزیکی و نرخ‌های خرابی ۲٪ و ۱۰٪ برای خرابی‌هایی از نوع بلوکی در دو حالت با و بدون هم‌پوشانی به تصویر کشیده است. این چنین منحنی‌هایی نشانه‌ای از درجه تنزل‌پذیری کارایی را که به دلیل الگوهای خرابی در شبکه پدید می‌آید، نشان می‌دهد. هنگامی که پیام‌ها از الگوریتم‌های تطبیقی برای مسیریابی در شبکه استفاده می‌کنند، آن دسته از الگوریتم‌هایی که نگهدارنده توان عملیاتی‌شان هستند برجسته‌تر و نمایان‌تر به چشم می‌آیند.

الگوریتم‌هایی که از مشارکت روش مسیریابی دوآتو بهره می‌برند، جابجائی پیام‌های شبکه را با درجه تطبیق‌پذیری بالاتری انجام می‌دهند و این پدیده به مدیریت ممتازتری از منابع (کانال‌های مجازی و مسیریاب‌های شبکه) منجر خواهد شد. در مقابل، طرح‌های مسیریابی‌ای که از مشارکت الگوریتم‌های مسیریابی کاملاً تطبیقی سود می‌جویند، فاقد مدیریت ارزش‌مندی از چنین سرمایه‌هایی هستند. در رویارویی با الگوهای خرابی، کانال‌های مجازی بیکار و هم‌چنین انحراف‌های زیاد الگوریتم مسیریابی کاملاً تطبیقی از مهم‌ترین دلایل برای توجیه چنین مسأله‌ای می‌باشد. در نتیجه، توان شبکه برای چنین الگوریتم‌هایی، به دلیل مدیریت معمولی منابع مورد اشاره، در حد متوسطی باقی خواهد ماند. هنگامی که پیامی با ناحیه خرابی برخورد می‌کند، هر یک از الگوریتم‌ها از یک طرح مسیریابی تحمل‌پذیر خطا برای دور زدن ناحیه خرابی استفاده می‌کنند. همان‌طور که از شکل پیداست، هر قدر که بار ترافیکی در سیستم ازدیاد می‌یابد، نمودار توان هر یک از این الگوریتم‌ها تقریباً به شکل یکنواختی تا رسیدن به یک نقطه بهینه‌ای در منحنی افزایش پیدا می‌کند. این موضوع می‌تواند بازتاب این واقعیت باشد که تحت بارهای ترافیکی سبک، میانگین تأخیر پیام در شبکه، مقدار اندکی دارد. اما در ورای این نقطه، تأخیر پیام به شکل منظمی افزایش یافته و در نتیجه، توان به‌دست آمده به شکلی ناگهان آفت پیدا خواهد کرد. دقت کنیم، هنگامی که نرخ ترافیک تولیدی، بزرگتر یا مساوی بیشینه توان عملیاتی اشباع باشد، میانگین تأخیر به بینهایت گرایده و در نتیجه توان شبکه به صفر میل خواهد کرد. از گفته‌های بالا درمی‌یابیم که هر قدر توان شبکه افزایش یابد، کارایی شبکه نیز بیشتر خواهد شد. نکته جالب توجه دیگر آن است که در صورت رسم خط مماسی از مبدأ به منحنی تأخیر پیام، مشتق منحنی توان نسبت به نرخ ترافیک در نقطه تماس صفر شده و



(الف)



(ب)

شکل ۵: نرخ ترافیک اشباع بر حسب تعداد کانال‌های مجازی برای طرح‌های مسیریابی چالاسانی- بوپانا (CB) و مبتنی بر نرم‌افزار (SB) با مشارکت الگوریتم‌های کاملاً تطبیقی و دوآتو در یک شبکه توری مدور 16×16 با طول پیام $M=128$ فلیت و نوع خرابی بلوکی (الف) غیرهم‌پوش و (ب) هم‌پوش با نرخ‌های خرابی $\theta = 2\%, 10\%$

۳-۱. معرفی معیار توان شبکه (Power)

همان‌طور که اشاره کردیم، در بسیاری از شبکه‌ها دو معیار کارایی میانگین تأخیر و توان عملیاتی با یکدیگر دائماً در رقابتند. نوعاً با افزایش توان عملیاتی سیستم (که گزینه‌ای مطلوب است) میانگین تأخیر پیام نیز افزایش خواهد یافت (که گزینه‌ای نامطلوب است). ترکیب توان عملیاتی و میانگین تأخیر پیام شبکه در معیاری واحد، ملاک ارزیابی دیگری را به نام توان به‌دست خواهد داد که به شکل نسبت توان عملیاتی شبکه بر تأخیر پیام تعریف می‌شود [۱۳]

توان عملیاتی شبکه

توان شبکه \triangleq

میانگین تأخیر پیام

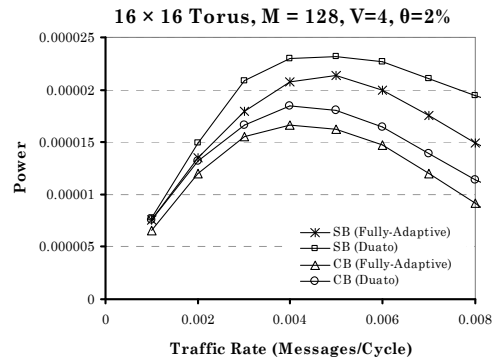
هر قدر که بار ترافیکی افزایش پیدا می‌کند، توان عملیاتی نیز افزایش یافته، لیکن تأخیرها بیشتر خواهند شد (به‌ویژه نزدیک به ناحیه اشباع شبکه) و آشکارا به مصالحه‌ای میان این دو پارامتر نیاز خواهیم داشت. بنابراین، مفهوم معیار توان شبکه در توجه به پی‌آمد چنین مصالحه‌ای سودمند جلوه می‌کند. این معیار می‌تواند به‌عنوان یک ملاک ارزیابی

اساسی از روی منحنی ناحیر معین ساخت.

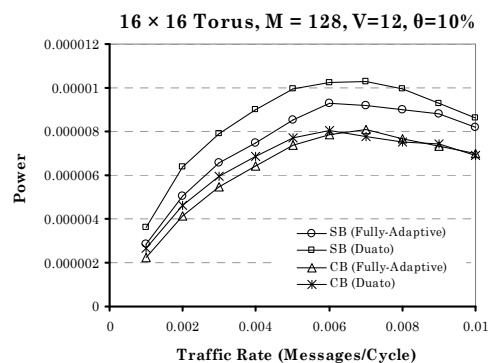
میزان بالاتر از محدوده مشخصی، بهبود دارایی قابل توجهی را به دست نخواهد داد. مدل‌های تحلیلی مقایسه‌ای نشان دادند که طرح مسیریابی تحمل‌پذیر خطای مبتنی بر نرم‌افزار در اغلب حالات به دلیل گردآوری و جذب پیام‌های مواجهه شده با خرابی در گره‌های محلی میانی و در نتیجه خالی ساختن شبکه از پیام‌های سرگردان، کارآیی مناسب‌تر و بهتری را در مقایسه با روش مسیریابی چالاسانی-بوپانا نمایش می‌دهد. ضمن آن‌که روش اخیر تنها قادر به رویارویی با خرابی‌هایی از نوع بلوکی است درحالی که روش مبتنی بر نرم‌افزار قابلیت مواجهه با هر دو خرابی از نوع کوژ یا کاو را دارا می‌باشد.

مراجع

- [1] ASCI Red Web Site: <http://www.sandia.gov/ASCI/Red/>.
- [2] Earth Simulator Center: <http://www.es.jamstec.go.jp/esc/eng/index.html>.
- [3] IBM BG/L Team, An overview of BlueGene/L Supercomputer, ACM Supercomputing Conf., 2002.
- [4] S. Chalasani, R.V. Boppana, Adaptive wormhole routing in tori with faults, *IEE Proc.- Comput. Digit. Tech.*, Vol. 42, No. 6, pp. 386-394, November 1995.
- [5] M. E. Go'mez, et al., A Routing Methodology for Achieving Fault Tolerance in Direct Networks, *IEEE Trans. on Computer*, Vol. 55, No. 4, pp. 400-415, Apr. 2006.
- [6] I. Theiss, Modularity, Routing and Fault Tolerance in Interconnection Networks, PhD thesis, Faculty of Mathematics and Natural Sciences, University of Oslo, Feb. 2004.
- [7] Y.J. Suh, B.V. Dao, J. Duato, and S. Yalamanchili, Software-based fault-tolerant oblivious routing in pipelined networks", Proc. 1995 Intl. Conf. Parallel Processing, Aug 1995.
- [8] Y.J. Suh, et al., Software-Based rerouting for fault-tolerant pipelined communication, *IEEE Trans. on Parallel and Distributed Systems*, Vol. 11, No. 3, March 2000.
- [9] F. Safaei, A. Khonsari, M. Fathy, M. Ould-Khaoua, Performance Analysis of Fault-Tolerant Routing Algorithm in Wormhole-Switched Interconnections, *Journal of Supercomputing*, 2007.
- [10] F. Safaei, M. Fathy, A. Khonsari, M. Ould-Khaoua, Stochastic Communication Delay Analysis of Adaptive Wormhole-Switched Routings in Tori with Faults, LNCS, *the Fifth International Symposium on Parallel and Distributed Processing and Applications (ISPA)*, LNCS 4742, pp. 497-508, 2007.
- [11] W. J. Dally, B. Towles, Principles and practices of interconnection networks, Morgan Kaufman Publishers, New York, 2004.
- [12] J. Duato, A new theory of deadlock-free adaptive routing in wormhole networks, *IEEE Transactions Parallel Distributed Systems*, Vol. 4, No. 12, pp. 1320-1331, 1993.
- [13] L. Kleinrock, Power and deterministic rules of thump for probabilistic problems in computer communications, *Int. Conf. on Communication*, Vol. 1, No. 10, pp. 43.1.1-43.1.10, 1979.



(الف)



(ب)

شکل ۶: مقایسه توان شبکه در برابر نرخ ترافیک برای طرح‌های مسیریابی چالاسانی-بوپانا (CB) و مبتنی بر نرم‌افزار (SB) با مشارکت الگوریتم‌های کاملاً تطبیقی و دوآتو در یک شبکه توری مدور 16×16 با طول پیام $M=128$ فلیت، تعداد $V=4, 12$ کانال مجازی در هر کانال فیزیکی و نوع خرابی بلوکی (الف) غیر هم‌پوش و (ب) هم‌پوش با نرخ‌های $\theta = 2\%, 10\%$

۴- نتیجه‌گیری

در گذشته الگوریتم‌های مسیریابی در شبکه‌های عاری از خطا به شکل گسترده‌ای بررسی و مطالعه شده‌اند. از طرفی هر قدر که اندازه شبکه افزایش می‌یابد، احتمال این‌که پردازنده‌ها و پیوندهای مرتبط با آن‌ها نیز دچار خرابی شوند افزایش خواهد یافت. بنابراین، طراحی و پیاده‌سازی الگوریتم‌های مسیریابی تحمل‌پذیر خطا که سبب می‌شوند پیام‌ها بتوانند- حتی با وجود مؤلفه‌های معیوب کماکان به راه خویش ادامه دهند- ضرورت پیدا می‌کند. در این مقاله ما از رویکرد مدل‌سازی تحلیلی برای انجام تحلیل‌های مقایسه‌ای میان دو طرح شناخته شده چالاسانی-بوپانا و مبتنی بر نرم‌افزار استفاده کردیم. آزمون‌های شبیه‌سازی نشان دادند که افزایش تعداد کانال‌های مجازی در کانال فیزیکی می‌تواند به کاهش اثر نرخ خرابی در کارآیی شبکه به ویژه برای شبکه‌هایی که با تعداد کم و متوسطی از کانال‌های مجازی تجهیز