

بر آورد احتمال برخورد پیام با حلقه‌ها و زنجیره‌های خرابی: ارائه ملاکی جدید برای ارزیابی کارایی مسیریابی‌های تطبیقی تحمل‌پذیر خطا در شبکه‌های توری

فرشاد صفایی*، محمد مهدی گیلک[†] و احمد خونساری[‡]

* دانشگاه آزاد اسلامی، واحد تهران شمال
safaei@ipm.ir

[†] دانشکده علوم کامپیوتر، دانشگاه شهید بهشتی

m_m_gilak@yahoo.com

[‡] دانشکده فنی دانشگاه تهران

ak@ipm.ir

چکیده: یکی از مسایل اساسی در پردازش‌های موازی، چگونگی انجام عمل مسیریابی به شکلی کارآمد در یک شبکه‌ای است که هر مؤلفه‌اش با احتمالی به خرابی دچار می‌شود. در چنین سیستم‌هایی الگوریتم‌های مسیریابی تطبیقی تحمل‌پذیر خطا غالباً با هدف استمرار عملیات آن در حضور یک یا چند خرابی با امکان تنزل مطبوع سیستم معرفی و پیشنهاد شده‌اند. بسیاری از الگوریتم‌ها درگیر افزودن فضای بافر و منطق کنترلی پیچیده به گره‌های مسیریابی هستند. اما افزودن مدارهای منطقی اضافی و بافرها سبب می‌شوند که گره‌ها در معرض خرابی قرار گرفته و اطمینان‌پذیری آن‌ها کمتر گردد. علاوه بر این، چنان‌چه شکل الگوهای خرابی محدود باشد، آن‌گاه بسیاری از گره‌های سالم نیز قربانی خواهند شد. واضح است که چنین راه‌حلی مطلوب نیست و این خود به انگیزه‌ای در یافتن راه‌کارهایی برای استفاده کارآمدتر از گره‌های فعال منجر خواهد شد. یکی از چنین رهیافت‌ها برای کاهش تعداد گره‌های عملیاتی که باید به شکل غیرفعال در نظر گرفته شوند، بر پایه مفهوم حلقه‌های خرابی بنا نهاده شده است. هم‌چنین روش‌های به‌کار گرفته شده در سوئیچینگ‌های تحمل‌پذیر خطا و طرح مسیریابی مبتنی بر نرم‌افزار از مواردی هستند که برای پشتیبانی از مسیریابی منعطف‌تر حول و حوش الگوهای خرابی به‌کار گرفته شده‌اند. پیش از آن‌که چنین طرح‌هایی بتوانند به شکل موفقیت‌آمیزی در شبکه‌ها استفاده شوند، لازم است از عواملی که پتانسیل کارایی آن‌ها را تحت تأثیر قرار می‌دهند درک عمیقی داشته باشیم. در این مقاله، برای نخستین بار، یک راه‌حل تحلیلی عام برای محاسبه احتمال مواجه شدن پیام‌ها با حلقه‌ها و زنجیره‌های خرابی در شبکه‌های توری با به‌کارگیری مسیریابی تطبیقی ارائه شده است. هم‌چنین، آزمون‌های شبیه‌سازی بسیاری برای انواع مختلف خرابی‌ها اجرا شده که نتایج برآمده از آن‌ها می‌تواند برای اعتبارسنجی مدل‌های ریاضی پیشنهادی استفاده شود.

کلمات کلیدی: تحمل‌پذیری خطا، شبکه‌های میان ارتباطی، شبکه توری، حلقه خرابی، زنجیره خرابی، مسیریابی تطبیقی و ارزیابی کارایی.

۱- مقدمه

تحمل‌پذیر خطا به دلیل خیزش‌های عظیم در عمومی شدن پردازنده‌های بزرگ موازی [۱]، سیستم‌های خوشه‌ای [۲]، سیستم‌های موبایل [۳]، شبکه‌های سنسور [۴] و شبکه‌های بر تراشه (NoC) [۵] از نو مورد توجه قرار گرفته‌اند.

کارهای بسیاری درباره الگوریتم‌های مسیریابی تحمل‌پذیر خطا در شبکه‌های میان ارتباطی انجام پذیرفته است [۶-۱۸]. نوعاً به محدودیت‌های افزونه مسیریابی و منابع بیشتر شبکه برای حصول اطمینان عاری از بن بست بودن این الگوریتم‌ها در رویارویی با خرابی‌ها نیاز می‌باشد [۶-۱۸]. افزون بر این، خرابی‌ها ممکن است در مجموعه‌های خرابی گروه‌بندی شوند و نواحی خرابی (برای نمونه،

ارتباطات در شبکه‌های دارای مؤلفه‌های خرابی یکی از حوزه‌های سنتی در نظریه شبکه‌ها محسوب می‌شود. در عمل، به دلایل آشکار نمی‌توان همواره امید داشت که گره‌ها و پیوندهای ارتباطی بدون رویارویی با خرابی‌ها بتوانند به فعالیت خویش ادامه دهند. خطاهای نرم‌افزاری و سخت‌افزاری ممکن است گره‌ها یا پیوندها را با مشکلاتی مواجه سازند. برای آن‌که بتوان بدون تنزل جدی در کیفیت خدمات سرویس (QoS) با خرابی‌ها سازگار شد، شبکه‌ها و قراردادهای مسیریابی باید به‌گونه‌ای تنظیم شوند که تحمل‌پذیر با خطا باشند. اخیراً، الگوریتم‌های

می‌نوان هر شکل خرابی دلخواهی را، با برچسب زنی برخی پردازنده‌ها/گره‌ها به عنوان معیوب، به مانند یک خرابی بلوکی نگریست و آن را مدل کرد [۸-۱۰]. و بالاخره این‌که، خرابی بلوکی را می‌توان برای مدل‌سازی خرابی‌های موجود در تراشه، واحدهای چندتراشه‌ای و خرابی‌های سطح بُرد در شبکه‌هایی با ساختارهای مُشبک (grid)، به‌ویژه در هم‌بندی‌های توری و توری مدور به‌کار گرفت.

ادامه مقاله به شرح زیر ساماندهی شده است. بخش ۲ مفاهیم اصلی مرتبط را فراهم آورده و بینشی را درباره تحمل‌پذیری خطا در سطح گره و شبکه پیش روی خواننده قرار می‌دهد. در بخش ۳، ما با جزئیات، احتمال برخورد پیام‌ها را با حلقه‌ها و زنجیره‌های خرابی در هم‌بندی توری محاسبه خواهیم کرد. این بخش هم‌چنین توسعه‌ای از رویکرد تحلیلی پیشنهادی را به منظور سر و کار داشتن با حلقه‌ها و زنجیره‌های خرابی هم‌پوش شرح داده است. عبارات‌های ریاضی این احتمال به وسیله روش شبیه‌سازی نرم‌افزاری در بخش ۴ اعتبارسنجی شده‌اند. و بالاخره، بخش ۵ کار گزارش شده در این مقاله را خلاصه کرده و سمت و سوها را برای پژوهش‌های آتی نمایان ساخته است.

۲- تعاریف و اصطلاحات

در این بخش ما اصطلاحات مرتبط با شبکه‌های میان ارتباطی و مفاهیم تحمل‌پذیری خطا را بازگو می‌کنیم. برخی تعاریف برای کامل ساختن بحث از کارهای پیشین [۷-۹، ۱۱، ۱۲، ۱۷-۲۰] وام گرفته شده‌اند.

۲-۱. هم‌بندی شبکه توری

شبکه توری با توجه به ویژگی‌های مطلوبش از جمله سادگی پیاده‌سازی و توانایی در نمایش ارتباطات برای کاهش تأخیر پیام [۹، ۱۰، ۱۵-۱۷، ۱۹، ۲۰] از شناخته‌شده‌ترین هم‌بندی‌های شبکه‌های میان ارتباطی در سیستم‌های امروزی به‌شمار می‌آید.

تعریف ۱ [۲۰]: هر شبکه توری دو بُعدی $R \times C$ که با $M_{R \times C}$ بیان می‌شود، از مجموعه‌ای از گره‌های $V(M_{R \times C}) = \{(x, y) : 1 \leq x \leq R, 1 \leq y \leq C\}$ تشکیل شده به طوری که هر گره (x_1, y_1) به همسایه‌های $(x_1 \pm 1, y_1)$ و $(x_1, y_1 \pm 1)$ در صورت وجود متصل می‌گردد. کلاً $N = R \times C$ گره و $E = 2 \times R \times C - R - C$ کانال ارتباطی در هر $M_{R \times C}$ وجود دارند.

تعریف ۲: هر پیوند یک رسانه ارتباطی نقطه به نقطه است که دو گره را با بافرهایی در هر سو به یکدیگر متصل می‌سازد. پیوندهای ارتباطی ممکن است یک‌طرفه (unidirectional) یا دو طرفه (bidirectional) باشند.

نواحی خرابی دوز (convex) معرفی شده توسط چین و لیم [۱۶] چشم‌گیرتر باشند؛ زیرا مدل آن‌ها تنها با خرابی‌هایی که در مرز شبکه قرار داشتند سر و کار دارد. برای هر ناحیه خرابی در یک شبکه، می‌توان مؤلفه‌های سالم حول آن ناحیه را به یکدیگر متصل ساخت تا یک حلقه خرابی (fault-ring) تشکیل شود و در صورتی که حلقه خرابی مرزهای شبکه توری (mesh) را ملاقات کند به آن زنجیره خطا یا به اختصار f-chain گفته می‌شود. بسیاری از پژوهش‌گران [۸-۱۳، ۱۰-۱۵] از مفاهیم حلقه‌ها و زنجیره‌های خرابی برای آن‌که الگوریتم‌های مسیریابی موجود بتوانند قادر به مدارا با چندین ناحیه خرابی باشند، بهره جسته‌اند. بدین ترتیب، بدون ناتوان ساختن یک گره فعال، اکنون پیام‌ها، بسته به موقعیت نسبی مقصد، می‌توانند تحت یک الگوریتم مسیریابی تطبیقی (adaptive) حول حلقه‌ها یا زنجیره‌های خرابی مسیردهی و هدایت شوند. حلقه‌ها و زنجیره‌های خرابی را می‌توان با روش‌های توصیف شده در [۸-۱۳، ۱۰، ۱۵، ۱۸] ایجاد کرد. بنابراین، به منظور ارزیابی دقیقی از کارایی و ملاحظات چنین طرح‌های مسیریابی‌ای، باید قادر به واری مشخصه‌های حلقه‌ها و زنجیره‌های خرابی در شبکه‌ها باشیم.

چندین پژوهش انجام شده اخیر اهمیت تحمل‌پذیری خطا را در گستره وسیعی از سیستم‌ها و کاربردها مطرح ساخته‌اند [۱-۵، ۱۱، ۱۲ و ۱۸]. لیکن، تقریباً تمامی روش‌ها و الگوریتم‌های به‌کار رفته در سیستم‌های تحمل‌پذیر خطا برای مطالعه کارآمدی این قبیل سیستم‌ها تحت شرایط مختلف خرابی، به روش شبیه‌سازی توسل جسته‌اند. آزمون‌های شبیه‌سازی می‌توانند جزئیاتی را در خویش بگنجانند که برای مدل‌سازی تحلیلی دشوارند؛ لیکن توسعه آن‌ها زمان‌بر بوده و برای اعتبارسنجی نیز با دشواری‌هایی همراه می‌باشند. در مقابل، مدل‌سازی تحلیلی دربردارنده توسعه‌ای از یک مدل ریاضی برای توصیف رفتار سیستم در درجه‌ای از جزئیات خواسته شده و حل کردن مدل برای به‌دست آوردن کارایی آن می‌باشد. بررسی انجام شده در این مقاله، یک ارزیابی کارایی (هم تحلیلی و هم شبیه‌سازی) برای الگوریتم‌های مسیریابی تطبیقی در شبکه‌های توری است. هدف ما در این مقاله، محاسبه احتمال برخورد با حلقه‌ها و زنجیره‌های خرابی است که توسط یک پیام هنگام استفاده از طرح مسیریابی تطبیقی تجربه می‌شود. بد نیست بدانیم که این پژوهش نخستین کوشش برای محاسبه احتمال برخورد پیام‌ها با حلقه‌ها و زنجیره‌های خرابی است که به منظور بررسی مزایای کارایی نسبی الگوریتم‌های مسیریابی تطبیقی تحمل‌پذیر خطا انجام پذیرفته است.

در این مقاله ما بر الگوهای خرابی مستطیل شکل (rectangular) متمرکز خواهیم شد. دلایل بسیاری برای بررسی خرابی‌های بلوکی وجود دارند. نخست این‌که آن‌ها می‌توانند چندین سناریوی معمول خرابی را هم‌چون خرابی گره‌ها و پیوندهای مستقل و نیز گره‌های

بلونی نیز می‌تواند ۶۱-۱۱، ۱۲-۱۱۶.

تعریف ۶: ناحیه‌ای مانند φ را کوژ گویند، اگر در آن هر پاره‌خطی که دو نقطه در φ را به یکدیگر متصل می‌کند به تمامی در داخل ناحیه φ قرار بگیرد. چنانچه ما "پاره‌خط" در تعریف استاندارد ناحیه کوژ را به پاره‌خط "عمودی" یا "افقی" تغییر دهیم، ناحیه به دست آمده قطعه-های کوژ یا خطوط مستقیم نامیده خواهد شد [۱۶]. هر ناحیه‌ای را که کوژ نباشد، کاو می‌نامند.

الگوهای مانند | (الگوی خطی)، | | (الگوی دو خط موازی) و \square (الگوی مستطیل شکل) جزو نواحی کوژ و الگوهای مانند U ، T ، H و L در رده الگوهای کاو شناخته می‌شوند.

۳- مدل تحلیلی

این بخش با توصیف مفروضات و نوتاسیون به کار رفته در ساخت مدل تحلیلی آغاز می‌شود و سپس استخراج و پیاده‌سازی روال مدل تحلیلی نشان داده می‌شود. پس از همه این‌ها، مدل تحلیلی به کمک برنامه شبیه‌ساز اعتبار سنجی خواهد شد.

۳-۱. مفروضات

مدل پیشنهادی بر پایه مفروضات زیر استوار است که معمولاً به شکل گسترده‌ای در ادبیات مربوطه مورد استفاده قرار گرفته [۷-۹، ۱۱، ۱۲، ۱۶-۲۰] و در زیر فهرست شده‌اند.

- مقصدهای پیام به شکل یکنواختی در سراسر گره‌های شبکه توزیع شده‌اند.
- پیام‌ها به شکل تطبیقی در شبکه مسیره می‌شوند. به علاوه، فرض می‌شود که هر پیام همیشه یکی از کوتاه‌ترین مسیرهای در دسترس را در غیاب خرابی بر می‌گزیند.
- الگوهای خرابی ایستا بوده [۹-۱۲، ۱۵-۱۷، ۱۹، ۲۰]، به تصادف در شبکه گسترده شده‌اند و شبکه را منفصل نمی‌سازند.
- گره‌ها (پردازنده‌ها) از پیوندهای ارتباطی پیچیده‌تر هستند و بدین ترتیب نرخ‌های خرابی بیشتری دارند [۱۲ و ۱۹]. از این رو، ما تنها خرابی‌هایی از نوع گره را در نظر می‌گیریم.
- هر گره با احتمالی برابر به خرابی دچار می‌شود و احتمالات خرابی گره‌ها در شبکه یکسان و مستقل از یکدیگر می‌باشد.

۳-۲. محاسبه احتمال برخورد پیام با حلقه خرابی در

شبکه توری

یک شبکه توری $R \times C$ را با تعدادی گره معیوب در نظر بگیرید که در یک مستطیل $h \times l$ ($1 \leq l < C - 1$, $1 \leq h < R - 1$) در کنار یکدیگر تعبیه شده‌اند. گره‌های معیوب سبب ناهم‌بندی شبکه توری مورد نظر نمی‌شوند. چنین شبکه‌ای را یک شبکه

همکی زوج‌های مبدأ/ مقصد (x_d / x_s) برای همکی $x_s \neq x_d$ وجود داشته باشد. در غیر این صورت آن را منفصل (disconnected) می‌نامند.

۲-۲. الگوریتم‌های مسیریابی

هم‌بندی بیان‌گر آن است که چگونه گره‌ها به یکدیگر اتصال می‌یابند، در حالی که الگوریتم مسیریابی توصیف کننده آن است که پیام‌ها در طی مسیر خویش از مبدأ به مقصد، کدام گره‌ها و پیوندها را ملاقات می‌کنند. همانند قبل، تعاریفی برای درک اصطلاحات جدید و ناآشنا به کار خواهیم برد. در این بخش، اصطلاحات مرتبط با الگوریتم‌های مسیریابی را شرح می‌دهیم.

تعریف ۴: الگوریتم مسیریابی \mathcal{R} از نظر صوری می‌تواند به‌عنوان تابع $\mathcal{R} : N \times N \rightarrow C$ تعریف شود که N مجموعه‌ای از گره‌ها و C مجموعه‌ای از کانال‌ها می‌باشد. فرض کنید گره جاری x_c و گره مقصد x_d باشد، تابع $\mathcal{R}(x_c, x_d)$ کانال $\langle x_c, y \rangle$ را باز می‌گرداند به طوری که y همسایه بلافاصله گره x_c است. \mathcal{R} را می‌توان به تابع تحدید مسیریابی (routing restriction function) $\mathcal{R}^R : N \times N \rightarrow \mathbb{P}(C)$ و یک تابع گزینش (selection function) تقسیم کرد به قسمی که $\mathbb{P}(C)$ مجموعه توانی C می‌باشد.

تعریف ۵: تابع تحدید مسیریابی الگوریتم مسیریابی $\mathcal{R} (\mathcal{R}^R)$ ، ورودی اصلی را از \mathcal{R} می‌گیرد و مجموعه‌ای از کانال‌های $\{ \langle x_c, y_1 \rangle, \langle x_c, y_2 \rangle, \dots, \langle x_c, y_m \rangle \}$ ، $m \geq 0$ را باز می‌گرداند به طوری که y_i ها گره‌های همسایه x_c می‌باشند. چنانچه \mathcal{R}^R همیشه مجموعه کانالی با اندازه ۱ یا کمتر را بازگرداند، الگوریتم مسیریابی \mathcal{R} را قطعی (deterministic) و در غیر این صورت تطبیقی می‌گویند.

۲-۳. حالات خرابی و مدل‌های خطا

نخستین گام در بررسی خطا، دانستن طبیعت خرابی مؤلفه‌ها و آن‌گاه توسعه مدل‌های ساده‌ای است که به ما اجازه می‌دهند تا درباره خرابی‌ها و روش‌های سر و کار داشتن با آن‌ها، به آگاهی‌های سودمندی دست یابیم. خرابی‌هایی را که ممکن است در سیستم پدید آیند به عنوان حالات خرابی رده‌بندی می‌کنیم. هر حالت خرابی علت فیزیکی یک اشکال است. نویز گوسی کانال، از هم گسیختگی رشته‌های یک اتصال دهنده، پاشیدگی لحیم سرد بر روی بُرد، اتصال باز در منبع تغذیه، برخورد ذرات آلفا، مهاجرت الکترون‌های یک رسانا در تراشه، جابجایی ولتاژ آستانه یک دستگاه و خطاهای نرم افزاری، جملگی نمونه‌هایی از حالات خرابی هستند. مدل‌سازی خرابی‌های گره ممکن است به الگوهای مختلفی از مؤلفه‌های خرابی نیز منجر شود. گره‌های معیوب مجاور هم یک ناحیه خرابی را با یکدیگر تشکیل می‌دهند. نواحی خرابی از گسترش مؤلفه‌های معیوب پدید می‌آیند و خود به دو

می‌نامیم.

$P_{hit} \triangleq$ تعداد کل مسیرهای کمینه موجود در شبکه

در شبکه توری، مکان قرار گرفتن نقاط خرابی مهم است؛ بنابراین، برای مشخص ساختن مکان دقیق نقاط خرابی باید یکی از نقاط واقع در چهارگوشه الگوی خرابی مستطیل شکل را بدانیم. برای سازگاری، نقطه گوشه چپ و پائین الگوی خرابی مستطیل شکل را به عنوان نقطه مشخصه در نظر گرفته و با α نشان می‌دهیم. بدین ترتیب، برای مشخص کردن مکان دقیق الگوی خرابی - که در محاسبه P_{hit} اهمیت دارد - علاوه بر دانستن طول و عرض مستطیل (h, l) باید نقطه مشخصه آن را نیز بدانیم. مجموعه نقاط الگوی خرابی مستطیل شکل (h, l) با نقطه مشخصه α را با $F(h, l, \alpha)$ نمایش می‌دهیم و همچنین، مجموعه نقاط f-ring حول این الگوی خرابی را با $R(h, l, \alpha)$ نشان می‌دهیم. بدیهی است که $x \in F(h, l, \alpha)$ اما $x \notin R(h, l, \alpha)$ مجموعه $F(h, l, \alpha) \cup R(h, l, \alpha)$ با $FR(h, l, \alpha)$ توصیف می‌شود.

قضیه ۱: تعداد کل مسیرهای موجود میان گره‌های سالم در شبکه توری $R \times C$ هم‌بند با الگوی خرابی مستطیل شکل $h \times l$ و نقطه مشخصه α برابر است با

$$\sum_{a, b \in v(M_{R \times C}) \setminus F(h, l, \alpha)} \binom{|x_b - x_a| + |y_b - y_a|}{|x_b - x_a|} \quad (2)$$

برهان: دو نقطه سالم مفروض a و b را در شبکه مزبور در نظر بگیرید، تعداد مسیرهای بین a و b برابر است با

$$\binom{|x_b - x_a| + |y_b - y_a|}{|x_b - x_a|} \quad (3)$$

پس، تعداد کل مسیرهای موجود میان نقاط سالم در شبکه توری $R \times C$ با مجموع تعداد مسیرهای بین هر دو نقطه سالم در شبکه برابر است. یعنی

$$\sum_{a, b \in v(M_{R \times C}) \setminus F(h, l, \alpha)} \binom{|x_b - x_a| + |y_b - y_a|}{|x_b - x_a|} \quad (4)$$

در ادامه بحث لازم است که جهت هر مسیر در شبکه توری را نسبت به محورهای مختصات بدانیم. دو نقطه $a = (x_a, y_a)$ و $b = (x_b, y_b)$ را در شبکه توری $R \times C$ در نظر بگیرید. فرض کنید می‌خواهیم از a به b برویم. جدول ۱ جهت حرکت یک پیام را در بُدهای X و Y در یک شبکه توری توصیف می‌کند.

تعریف ۷: یک شبکه $R \times C$ توری مدور هم‌بند را با الگوی خرابی مستطیل شکل $h \times l$ در آن در نظر بگیرید. مجموعه گره‌هایی را که از نقاط مرزی این الگوی خرابی به فاصله یک گام قرار دارند، حلقه خرابی (f-ring) می‌نامیم.

تعریف ۸: در صورتی که حلقه خرابی مرزهای شبکه توری را ملاقات کند، آن را زنجیره خرابی (f-chain) می‌نامیم.

تعریف ۹ (مسیر کمینه از نقطه $a = (x_a, y_a)$ به نقطه $b = (x_b, y_b)$): S را مجموعه همگی دنباله‌های متشکل از حرکت‌های روبه جلو، روبه پشت، روبه بالا و رو به پائین می‌نامیم. به طوری که تمامی اعضای S از نقطه $a = (x_a, y_a)$ آغاز و در $b = (x_b, y_b)$ پایان می‌پذیرند. طول کوتاه‌ترین دنباله از S را s_0 فرض می‌کنیم؛ در این صورت یک مسیر از a به b عضوی از مجموعه S به طول s_0 می‌باشد.

تعریف ۱۰: فاصله بین مؤلفه‌های اول نقاط $a = (x_a, y_a)$ و $b = (x_b, y_b)$ در یک شبکه توری $R \times C$ برابر است با $|x_b - x_a|$ که این فاصله را با نماد $\Delta_x(a, b)$ نشان می‌دهیم (در یک شبکه توری $R \times C$ ، فاصله بین مؤلفه‌های دوم نقاط $a = (x_a, y_a)$ و $b = (x_b, y_b)$ برابر $|y_b - y_a|$ می‌باشد که این فاصله را با نماد $\Delta_y(a, b)$ نمایش می‌دهیم).

تعریف ۱۱: مجموعه رئوس شبکه $M_{R \times C}$ را $v(M_{R \times C})$ می‌نامیم.

تعریف ۱۲: تعداد مسیرهای (کمینه) بین دو نقطه سالم $a, b \in v(M_{R \times C})$ را $LT(a, b)$ نمایش می‌دهیم و مقدار آن عبارتست از

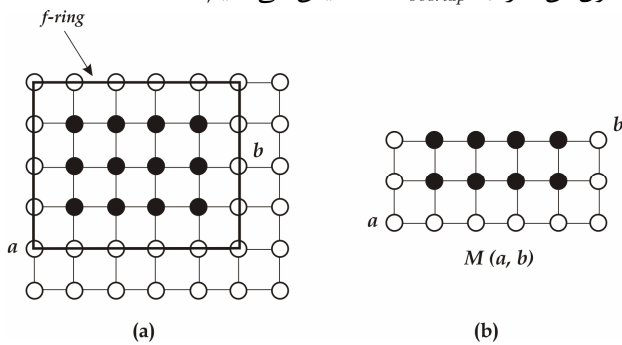
$$\binom{|x_b - x_a| + |y_b - y_a|}{|x_b - x_a|} \quad (1)$$

در این بخش، هدف ما محاسبه احتمال برخورد یک مسیر با نقاط f-ring در شبکه توری می‌باشد که آن را با P_{hit} نشان می‌دهیم.

یادداشت: منظور از برخورد یک مسیر با f-ring وجود یک یا چند نقطه از مجموعه نقاط متعلق به f-ring در مسیر مورد نظر است.

برای محاسبه P_{hit} ، تعداد کل مسیرهای موجود در شبکه را که با f-ring برخورد دارند شمرده و بر تعداد کل مسیرهای موجود در شبکه تقسیم می‌کنیم. چنین احتمالی به صورت زیر تعریف می‌شود

حول آن‌ها را با $FR_{overlap}$ نمایش می‌دهیم.



شکل ۱: (a) یک شبکه توری 6×7 با دو نقطه اختیاری a و b در حضور بلوک خرابی و f -ring متناظر با آن و (b) نمایش زیر شبکه توری $M(a,b)$

تعریف ۱۴: تابع $\mathcal{F} : \mathbb{P}(M_{R \times C}) \rightarrow v(M_{R \times C})$ را تابع تحدید شبکه $M_{R \times C}$ می‌نامیم که در آن $\mathbb{P}(M_{R \times C})$ مجموعه تمامی زیر شبکه‌های توری شبکه $M_{R \times C}$ می‌باشد که نرم آن برابر $2 \binom{R-C}{2}$ و ضابطه تابع در زیر بیان شده است

ضابطه (۱) اگر مجموعه نقاط خرابی به شکل مستطیل $h \times l$ با نقطه مشخصه α و f -ring دور آن باشند.
ضابطه (۲) اگر مجموعه نقاط خرابی به شکل دو مستطیل هم‌پوش با نقاط مشخصه α_1, α_2 و f -ring دور آن‌ها باشند.

$$\mathcal{F}(M(a,b)) = \begin{cases} M(a,b) \cap FR(h,l,\alpha) \\ M(a,b) \cap FR_{overlap} \end{cases} \quad (5)$$

تعریف ۱۵: اگر a و b دو نقطه سالم از $v(M_{R \times C})$ باشند و C_j و C_i نیز دو نقطه دلخواه از $\mathcal{F}(M(a,b))$ باشند، آن‌گاه تعداد مسیرهای ممکن از C_j به C_i به طوری که جهت هر یک از این مسیرها در بُعد $(Y)X$ با جهت هر حرکت در مسیری از a به b در بُعد $(Y)X$ هم‌سو باشد، با $LM_{a,b}(C_j, C_i)$ نمایش می‌دهیم و مقدار آن برابر است با

$$\begin{pmatrix} \Delta_x^{a,b}(C_j, C_i) + \Delta_y^{a,b}(C_j, C_i) \\ \Delta_x^{a,b}(C_j, C_i) \end{pmatrix} \quad (6)$$

که در آن $\Delta_x^{a,b}(C_j, C_i)$ تابعی است دو ضابطه‌ای و ضابطه آن عبارتست از

$$\Delta_x^{a,b}(C_j, C_i) = \begin{cases} |x_{C_i} - x_{C_j}| & (x_b - x_a \geq 0 \text{ and } x_{C_i} - x_{C_j} \geq 0) \\ & \text{or} \\ & (x_b - x_a < 0 \text{ and } x_{C_i} - x_{C_j} < 0) \\ -|x_{C_i} - x_{C_j}| & \text{otherwise} \end{cases} \quad (7)$$

جهت حرکت	شرط
در بُعد X از $a = (x_a, y_a)$ به $b = (x_b, y_b)$ در جهت X^+ خواهد بود.	$x_b - x_a \geq 0$
در بُعد X از $a = (x_a, y_a)$ به $b = (x_b, y_b)$ در جهت X^- خواهد بود.	$x_b - x_a < 0$
در بُعد Y از $a = (x_a, y_a)$ به $b = (x_b, y_b)$ در جهت Y^+ خواهد بود.	$y_b - y_a \geq 0$
در بُعد Y از $a = (x_a, y_a)$ به $b = (x_b, y_b)$ در جهت Y^- خواهد بود.	$y_b - y_a < 0$

مثال ۱: یک شبکه توری 6×7 را با الگوی خرابی مستطیل شکل 3×4 و نقطه مشخصه $\alpha = (2,3)$ در نظر بگیرید (به شکل ۱ نگاه کنید). می‌خواهیم از $a = (1,2)$ به نقطه $b = (6,4)$ برویم. در این شبکه، یک مسیر کمینه از a به b به صورت زیر وجود دارد

$$a = (1,2) \rightarrow (2,2) \rightarrow (3,2) \rightarrow (4,2) \rightarrow (5,2) \rightarrow (6,2) \rightarrow (6,3) \rightarrow (6,4) = b$$

بنابراین، مجموعه مؤلفه‌های اول گره‌های موجود در این مسیر عبارتست از

$$\{1,2,3,4,5,6\}$$

و هم‌چنین مجموعه مؤلفه‌های دوم گره‌های موجود در این مسیر برابر است با

$$\{2,3,4\}$$

بدین ترتیب داریم

$$\begin{aligned} M(a,b) &= \{1,2,3,4,5,6\} \times \{2,3,4\} \\ &= \{(1,2), (1,3), (1,4), (2,2), (2,3), \\ &\quad (2,4), (3,2), (3,3), (3,4), (4,2), \\ &\quad (4,3), (4,4), (5,2), (5,3), (5,4), \\ &\quad (6,2), (6,3), (6,4)\} \end{aligned}$$

و نقاط خرابی موجود در $M(a,b)$ عبارتند از

$$M(a,b) \cap F(h,l,\alpha) = \{(2,3), (2,4), (3,3), (3,4), (4,3), (4,4), (5,3), (5,4)\}$$

تعریف ۱۳: اگر مجموعه نقاط خرابی به شکل مستطیل $h \times l$ با نقطه مشخصه α و f -ring حول آن باشند، آن‌گاه مجموعه نقاط خرابی و نقاط f -ring حول آن را با $FR(h,l,\alpha)$ نمایش می‌دهیم. چنان‌چه مجموعه نقاط خرابی مورد نظر به شکل دو مستطیل هم‌پوش $h_1 \times l_1$ و $h_2 \times l_2$ با نقاط مشخصه α_1 و α_2 همراه با

همپوش در شبکه توری

برای محاسبه P_{hit} در حالت همپوشانی در شبکه توری، فرض می‌کنیم که دو بلوک خرابی $F_1(h_1, l_1, \alpha_1)$ و $F_2(h_2, l_2, \alpha_2)$ در شبکه قرار دارند. مجموعه کل نقاط خرابی با هفت مشخصه معین می‌شوند: $\alpha_2, \alpha_1, h_2, h_1, l_2, l_1$ ، طول یا عرض مشترک. مجموعه همگی نقاط خرابی را در حالت همپوشانی با $F_{overlap}$ و f -ring حول مستطیل اول را با $R_1(h_1, l_1, \alpha_1)$ و f -ring حول مستطیل دوم را با $R_2(h_2, l_2, \alpha_2)$ نشان می‌دهیم.

قضیه ۳: تعداد کل مسیره‌های موجود در شبکه $M_{R \times C}$ با $FR_{overlap}$ برابر است با

$$\sum_{a,b \in v(M_{R \times C}) \setminus F_{overlap}} \begin{pmatrix} |x_b - x_a| + |y_b - y_a| \\ |x_b - x_a| \end{pmatrix} \quad (13)$$

برهان: مشابه قضیه ۱ می‌باشد. ■

مانند قبل می‌توانیم برای هر دو نقطه a و b در شبکه $M_{R \times C}$ ، یک شبکه توری $M(a, b)$ تعریف کنیم.

قضیه ۴: اگر $M_{R \times C}$ یک شبکه توری همبند با دو مستطیل خرابی $F_1(h_1, l_1, \alpha_1)$ و $F_2(h_2, l_2, \alpha_2)$ باشد و مجموعه نقاط f -ring آن‌ها را با $R_{overlap} = R_1(h_1, l_1, \alpha_1) \cup R_2(h_2, l_2, \alpha_2)$ نشان دهیم، آن‌گاه تعداد مسیره‌هایی که از f -ring نمی‌گذرند برابر است با

$$\sum_{a,b \in v(M_{R \times C}) \setminus FR_{overlap}} \det_{0 \leq i, j \leq C_{a,b}} d_{ij}(a, b) \quad (14)$$

که در آن

$$FR_{overlap} = F_{overlap} \cup R_{overlap} \\ \|\mathcal{F}(M(a, b))\| = C_{a,b}$$

برهان: هر مسیری که به $F_{overlap}$ برخورد کند از f -ring ها (یعنی $R_{overlap}$) خواهد گذشت پس تعداد مسیره‌هایی که از نقاط $R_{overlap}$ نمی‌گذرند با تعداد مسیره‌هایی که از نقاط $FR_{overlap}$ نمی‌گذرند، برابر خواهد بود. اکنون دو نقطه دلخواه a و b را از $v(M_{R \times C}) \setminus FR_{overlap}$ در نظر بگیرید. تعداد مسیره‌هایی (کمینه) از a به b که از نقاط $\mathcal{F}(M(a, b))$ نمی‌گذرند با $\det_{0 \leq i, j \leq C_{a,b}} d_{ij}(a, b)$ برابر است. پس، تعداد مسیره‌هایی (کمینه) از a به b که از نقاط $FR_{overlap}$ نمی‌گذرند با $\det_{0 \leq i, j \leq C_{a,b}} d_{ij}(a, b)$ برابر خواهد بود. لذا، تعداد کل مسیره‌های موجود در $M_{R \times C}$ که از $R_{overlap}$ نمی‌گذرند با مجموع تعداد مسیره‌های میان هر دو نقطه سالم $M_{R \times C}$ که از نقاط $FR_{overlap}$ نمی‌گذرند، برابر است

به Y به صورت زیر تعریف کرد

$$\Delta_y^{a,b}(C_j, C_i) = \begin{cases} |y_{C_i} - y_{C_j}| & (y_b - y_a \geq 0 \text{ and } y_{C_i} - y_{C_j} \geq 0) \\ & \text{or} \\ & (y_b - y_a < 0 \text{ and } y_{C_i} - y_{C_j} < 0) \\ -|y_{C_i} - y_{C_j}| & \text{otherwise} \end{cases} \quad (8)$$

قضیه ۴: اگر $M_{R \times C}$ یک شبکه توری $R \times C$ همبند با الگوی خرابی مستطیل شکل $h \times l$ با نقطه مشخصه α همراه با f -ring حول آن باشد، آن‌گاه تعداد مسیره‌هایی که از f -ring نمی‌گذرند برابر است با

$$\sum_{a,b \in v(M_{R \times C}) \setminus FR(h, l, \alpha)} \det_{0 \leq i, j \leq C_{a,b}} d_{ij}(a, b) \quad (9)$$

که در آن

$$FR(h, l, \alpha) = F(h, l, \alpha) \cup R(h, l, \alpha) \\ \|\mathcal{F}(M(a, b))\| = C_{a,b}$$

برهان: چون هر مسیری که به $FR(h, l, \alpha)$ برخورد می‌کند از f -ring خواهد گذشت، بنابراین تعداد مسیره‌هایی از نقاط f -ring نمی‌گذرند با تعداد مسیره‌هایی در $M_{R \times C}$ که از نقاط $FR(h, l, \alpha)$ نمی‌گذرند، برابر خواهد بود. اکنون، دو نقطه دلخواه $a, b \in v(M_{R \times C}) \setminus FR(h, l, \alpha)$ را در نظر بگیرید. تعداد مسیره‌هایی (کمینه) از a به b که از نقاط $\mathcal{F}(M(a, b))$ نمی‌گذرند با $\det_{0 \leq i, j \leq C_{a,b}} d_{ij}(a, b)$ برابر است. پس، تعداد مسیره‌هایی (کمینه) از a به b که از نقاط $FR(h, l, \alpha)$ نمی‌گذرند با $\det_{0 \leq i, j \leq C_{a,b}} d_{ij}(a, b)$ برابر خواهد بود. لذا، تعداد کل مسیره‌های ممکن بین هر دو نقطه سالم $M_{R \times C}$ که از نقاط $FR(h, l, \alpha)$ نمی‌گذرند عبارتست از

$$\sum_{a,b \in v(M_{R \times C}) \setminus FR(h, l, \alpha)} \det_{0 \leq i, j \leq C_{a,b}} d_{ij}(a, b) \quad (10)$$

بدین ترتیب

$$P_{miss} = \frac{\sum_{a,b \in v(M_{R \times C}) \setminus FR(h, l, \alpha)} \det_{0 \leq i, j \leq C_{a,b}} d_{ij}(a, b)}{\sum_{a,b \in v(M_{R \times C}) \setminus F(h, l, \alpha)} \begin{pmatrix} |x_b - x_a| + |y_b - y_a| \\ |x_b - x_a| \end{pmatrix}} \quad (11)$$

در نتیجه داریم

$$P_{hit} = 1 - P_{miss} \quad (12)$$

• برای هر زوج مبدا- مقصد، احتمال برخورد با حلقه‌ها یا زنجیره‌های خرابی محاسبه می‌شود.

شکل ۲ الگوریتم استفاده شده در رویکرد شبیه‌سازی را نشان می‌دهد. هم‌چنین، جدول ۲ نتایج برآمده از آزمون‌های شبیه‌سازی و مدل‌های تحلیلی را برای حلقه‌ها و زنجیره‌های خرابی با و بدون هم‌پوشانی در اندازه‌های گوناگون شبکه‌های توری و اندازه‌های مختلفی از نواحی خرابی فهرست کرده است.

0 Subroutine CalcMinHit (s, d)

```

1 Begin
2 for each source - destination pair ( $s, d$ ) do
3 Calculate the number of minimal paths from  $s$  to  $d$  that crossing
4 the fault rings (chain)
5 End
6 Algorithm: Calculating the probability of message facing the fault
7 rings (chain) for 2-D ( $R \times C$ ) mesh networks.
8 Input:  $R, C$ , fault set  $F$  /*  $F$  is a set of faulty nodes */
9 Output:  $P_{hit}$  /* the probability of facing the fault rings (chain) */
10 Procedure:
11 Begin
12  $MinPath \leftarrow 0$  /* number of all minimal routes in the network */
13  $MinHitPath \leftarrow 0$  /* number of all minimal routes crossing the
14 fault rings (chain) */
15 Create the fault rings (chain) around the fault regions and form the
16 set  $R$ 
17 /*  $R$  is the set of nodes reside in the fault rings (chain) */
18 Form the set  $FR \leftarrow F \cup R$  /* union of the fault set and the nodes
19 are on the fault rings (chain) */
20 for  $s \leftarrow 1$  to  $N$  do
21 for  $d \leftarrow 1$  to  $N$  do
22 If  $(s \neq d) \wedge s, d \notin F$  then
23  $MinHitPath \leftarrow CalcMinHit(s, d) + MinHitPath$ 
24 Let  $\mathfrak{R}_{s,d}$  be the number of minimal paths crossing from the source
25 node  $s$  to the destination node  $d$ 
26  $MinPath \leftarrow \mathfrak{R}_{s,d} + MinPath$ 
27 fi
28 od
29 od
30
31  $P_{hit} \leftarrow MinHitPath / MinPath$ 
32 End

```

شکل ۲: شبه‌گد استفاده شده برای محاسبه احتمال برخورد با حلقه‌ها و زنجیره‌های خرابی در شبکه توری دو بُعدی

۵- نتیجه‌گیری و پژوهش‌های آتی

الگوریتم‌های تطبیقی مسیریابی تحمل‌پذیر خطا برای شبکه‌های بزرگ موازی، سیستم‌های مبتنی بر خوشه، سیستم‌های موبایل، شبکه‌های سنسور و سیستم‌های بر تراشه چندپردازنده‌ای (MPSOCs) در طول سالیان اخیر موضوع پژوهش‌های فراوانی بوده است. پژوهش‌گران بسیاری، استفاده از حلقه‌ها، زنجیره‌های خرابی و هم‌چنین الگوهای خطا را به منظور تدارک مسیرهای انحرافی برای پیام‌های مسدود شده به دلیل خرابی‌ها و مسیره‌های آن‌ها حول نواحی خرابی در گزارش‌های خویش آورده‌اند. برای تحلیل کارایی چنین طرح‌های مسیره‌دهی باید

بدین ترتیب داریم

$$P_{miss} = \frac{\sum_{a,b \in v(M_{R \times C}) \setminus FR_{overlap}} \det_{0 \leq i, j \leq C_{a,b}} d_{ij}(a, b)}{\sum_{a,b \in v(M_{R \times C}) \setminus FR_{overlap}} \left(\begin{array}{c} |x_b - x_a| + |y_b - y_a| \\ |x_b - x_a| \end{array} \right)} \quad (16)$$

و اثبات کامل می‌شود. ■

در نتیجه

$$P_{hit(overlap)} = 1 - P_{miss(overlap)} \quad (17)$$

در شبکه توری $R \times C$ چنان‌چه نقاط خرابی مستطیل شکل به گونه‌ای باشند که یک یا دو ضلع آن با نقاط مرزی شبکه $M_{R \times C}$ منطبق باشند، آن‌گاه دیگر f-ring نخواهیم داشت و مجموعه نقاطی که به فاصله یک گام از نقاط مرزی مستطیل خرابی قرار دارند، به شکل یک زنجیره در خواهند آمد که ما آن را f-chain می‌نامیم. محاسبه P_{miss} و $P_{miss(overlap)}$ در حالت f-chain نیز مانند f-ring می‌باشد. در واقع f-chain حالتی خاصی از f-ring است و در صورتی که مجموعه نقاط f-chain حول مستطیل خرابی $h \times l$ با نقطه مشخصه α را $R(h, l, \alpha)$ بنامیم، آن‌گاه تمامی قضایای مطرح شده در این مقاله برای حالت f-chain نیز برقرار خواهند بود.

۴- نتایج شبیه‌سازی

در بخش ۳، ما عبارتهای ریاضی را برای برآورد احتمال روبرو شدن پیام با حلقه‌ها و زنجیره‌های خرابی (با یا بدون هم‌پوشانی) استخراج کردیم. این مدل‌های تحلیلی هسته اصلی محاسبه دیگر الگوهای خرابی را شکل می‌دهند و می‌توانند به دیگر هم‌بندی‌ها نیز تعمیم داده شوند. به منظور تأیید اعتبار روابط ریاضی استخراج شده در این مقاله، یک برنامه نرم‌افزاری تهیه شده است که می‌تواند گره‌های خرابی و هم‌چنین ایجاد حلقه‌ها و زنجیره‌های خرابی متناظر را در شبکه‌های توری دو بُعدی شبیه‌سازی کند. برنامه شبیه‌ساز، خرابی‌ها را در شبکه تولید می‌کند به طوری که خرابی‌ها نواحی مورد نظر را شکل می‌دهند. هم‌چنین شبیه‌ساز متصل بودن سایر گره‌های شبکه را در هنگام استفاده از مسیریابی تطبیقی بررسی می‌کند. هدف اصلی از این برنامه شبیه‌ساز، اندازه‌گیری مقادیر احتمالات برخورد پیام‌ها با حلقه‌ها و زنجیره‌های خرابی برای تعداد مختلفی از گره‌های خرابی در هم‌بندی توری است. در هر بار اجرا، برنامه شبیه‌ساز حلقه‌های خرابی را حول نواحی خرابی ایجاد کرده و آماره‌هایی از داده‌های زیر را به ثبت می‌رساند:

- تعداد مسیرهای کمینه‌ای که در شبکه وجود دارند.
- تعداد مسیرهای کمینه‌ای که با حلقه‌ها یا زنجیره‌های خرابی برخورد

150, 150, 1, pp. 27-37, Jan. 2003.

- [15] J. Zhou, F.C.M. Lau, Adaptive fault-tolerant wormhole routing with two virtual channels in 2D meshes, *Proc. of 7th Int. Symposium Parallel Architectures, Algorithms and Networks*, pp. 142-148, 2004.
- [16] J. Wu, Z. Jiang, On Constructing the Minimum Orthogonal Convex Polygon in 2-D Faulty Meshes, *IPDPS 2004*.
- [17] I. Theiss, *Modularity, Routing and Fault Tolerance in Interconnection Networks*, PhD thesis, Faculty of Mathematics and Natural Sciences, University of Oslo, Feb. 2004.
- [18] H. Gu, et al., A new routing method to tolerate both convex and concave faulty regions in mesh/torus networks, *The International Conference on Parallel and Distributed Computing, Applications and Technologies (PDCAT05)*, pp.714-719, Dec. 2005.
- [19] J. Duato, S. Yalamanchili, L.M. Ni, *Interconnection networks: An engineering approach*, Morgan Kaufmann Publishers, 2003.
- [20] J. Xu, *Topological structure and analysis of interconnection networks*, Kluwer Academic Publishers, 2001.

جدول ۲: نتایج شبیه‌سازی و تحلیلی احتمال برخورد پیام با الگوهای مختلف خرابی و اندازه‌های متفاوت شبکه توری

شبکه توری $M_{R \times C}$							مشخصه الگوی خرابی
10×10	9×6	7×9	8×8	6×6	6×5	3×3	
0.38	0.46	0.47	0.42	0.51	0.63	1.0	f -ring, $l=h=1$, $\alpha=(2,2)$
0.55	0.78	0.79	0.69	0.76	0.88	1.0	f -ring, $l=3, h=2$, $\alpha=(2,2)$
0.29	0.33	0.34	0.31	0.37	0.47	0.95	f -chain, $l=3, h=2$, $\alpha=(1,1)$
0.56	0.75	0.79	0.69	0.74	0.86	0.0	Overlapped f -rings, $l_1=h_1=1$, $l_2=1, h_2=2$, $\alpha_1=(2,2)$, $\alpha_2=(4,2)$
0.65	0.83	0.89	0.77	0.78	0.88	0.0	Overlapped f -rings, $l_1=1, h_1=2$, $l_2=1, h_2=2$, $\alpha_1=(2,2)$, $\alpha_2=(4,3)$
0.35	0.45	0.46	0.4	0.52	0.64	1.0	Overlapped f -chains, $l_1=h_1=1$, $l_2=h_2=1$, $\alpha_1=(1,3)$, $\alpha_2=(2,1)$
0.72	0.82	0.94	0.81	0.78	0.78	0.0	Overlapped f -ring, $l=2, h=3$, $\alpha=(4,2)$, f -chain, $l=h=1$, $\alpha=(2,1)$

نیم. در این معاله دوستیدیم نا عبارت‌های ریاضی‌ای را برای محاسبه احتمال مواجه شدن پیام‌ها با حلقه‌ها و زنجیره‌های خرابی در شبکه‌های توری استخراج کنیم. نتایج به دست آمده از مدل‌های تحلیلی توسط آزمون‌های شبیه‌سازی تأیید شدند و می‌توانند نقش مهمی را به عنوان ملاکی برای تحمل‌پذیری خرابی شبکه‌ها به هنگام مطالعه الگوریتم‌های مسیریابی تطبیقی تحمل‌پذیر خطا و به‌ویژه تحلیل کارایی آن‌ها بازی کنند. محاسبه و برآورد میانگین تأخیر یک پیام در گذر از شبکه‌ای که دارای خرابی است، از جمله کاربردهای مهم نتایج استخراج شده در این مقاله است. از آن‌جا که الگوهای مختلف خرابی اعم از کوژ (| -شکل، | -شکل و □ -شکل) یا کاو (L -شکل، + -شکل، H -شکل و U -شکل) به شکل گسترده‌ای در ادبیات تحمل‌پذیری خطا معرفی و استفاده شده‌اند، در راستای تداوم کار فعلی، یکی از توسعه‌های چالش‌برانگیز می‌تواند ارائه عبارت‌های ریاضی برای برآورد احتمال برخورد با چنین الگوهایی باشد که پیام در هنگام گذر از شبکه دارای خطا تجربه می‌کند.

مراجع

- [1] S. Chakravorty, L. V. Kalé, A Fault Tolerant Protocol for Massively Parallel Systems, *Proceedings of the 16th International Symposium on Parallel and Distributed Processing*, 2004.
- [2] J. N. Al-Karaki, Performance Analysis of Repairable Cluster of Workstations, *Proceedings of the 16th International Symposium on Parallel and Distributed Processing*, 2004.
- [3] D. Karimou, J. Myoupo, A Fault-Tolerant Permutation Routing Algorithm in Mobile Ad-Hoc Networks, *Lecture Notes on Computer Science*, Vol. 3421, pp.107-115, 2005.
- [4] G. Gupta, M. Younis, Fault-tolerant clustering of wireless sensor networks, *IEEE Conf. on Wireless Communications and Networking*, pp. 1579-1584, Mar. 2003.
- [5] P. P. Pande, et al., Performance Evaluation and Design Trade-Offs for Network-on-Chip Interconnect Architectures, *IEEE Trans. Computers*, Vol. 54, No. 8, pp.1025-1040, Aug. 2005.
- [6] A. A. Chien, J. H. Kim, Planar-adaptive routing: Low-cost adaptive networks for multiprocessors, *Proceedings of the 19th Annual International Symposium on Computer Architecture*, pp. 268-277, 1992.
- [7] J. Duato, A theory of fault-tolerant routing in wormhole networks, *IEEE Transactions on Parallel and Distributed Systems*, Vol. 8, No. 8, Aug. 1997.
- [8] S. Chalasani, R.V. Boppana, Adaptive wormhole routing in tori with faults, *IEE Proc.- Comput. Digit. Tech.*, Vol. 42, No. 6, pp. 386-394, Nov. 1995.
- [9] R. V. Boppana, S. Chalasani, Fault-Tolerant Wormhole Routing Algorithms for Mesh Networks, *IEEE Trans. Computers*, Vol. 44, No. 7, pp. 848-864, 1995.
- [10] Y. M. Boura, C. R. Das, Fault-tolerant routing in mesh networks, *International Conference on Parallel Processing*, pp. I-106-I-109, 1995.
- [11] B. V. Dao, J. Duato, S. Yalamanchili, Dynamically configurable message flow control for fault-tolerant routing, *IEEE Transactions on Parallel and Distributed Systems*, Vol. 10, NO. 1, pp. 7-22, Jan. 1999.
- [12] Y.J. Suh, et al., Software-based rerouting for fault-tolerant pipelined communication, *IEEE Trans. On Parallel and Distributed Systems*, Vol. 11, No. 3, Mar. 2000.
- [13] C. L. Chen, G. M. Chiu, A Fault-tolerant routing scheme for meshes with nonconvex faults, *IEEE Trans. on Parallel and Distributed Systems*, Vol. 12, No. 5, pp. 467-475, May 2001.