مجلة جامعة طرطوس للبحوث والدراسات العلمية _ سلسلة العلوم الهندسية المجلد (10) العدد (10) 2026
Tartous University Journal for Research and Scientific Studies - engineering Sciences Series Vol. (10) No. (10) 2026

تحليل الأداء والوثوقية في شبكات الربط التفرعية المكعبية

*م. روزا درويش

(تاريخ الإيداع 2026/1/22 . قُبِل للنشر في 2026/5/24)

□ ملخّص □

تُعدّ شبكات الربط البيني المكعبية من البنى الحاسمة في تنفيذ الدارات عالية التكامل لتطبيقات الحوسبة التفرعية عالية الأداء. تتميز هذه البنية بقابلية توسع استثنائية وانتظام هيكلي، حيث تمتلك كل عقدة k من منافذ الإدخال والإخراج في شبكة k–مكعبية. يواجه التحدي الرئيسي في تحقيق التوازن الأمثل بين تسامح الأعطال والأداء العالي، خاصة مع تزايد حجم الشبكات حيث أظهرت دراسات Google أن العناقيد بحجم 8000 عقدة تعاني من معدل فشل يصل إلى ثلثي العقد سنوياً (Google Inc., 2024).

يهدف هذا البحث إلى تطوير وتحليل بنية محسّنة للشبكة المكعبية الأساسية k–بُعد باستخدام تقنيات الفائضية في العقد والوصلات معاً، مع تنفيذ برمجي كامل بواسطة MATLAB. أظهرت النتائج تحسناً ملموساً في الوثوقية يتصاعد بشكل واضح مع ارتفاع احتمالية العطل، إذ يكون التحسن محدوداً عند مستويات العطل المنخفضة ويتحول إلى تحسن جوهري كبير عند مستويات العطل العالية، وذلك بصورة خاصة في الشبكات ذات الأبعاد الأعلى. يتحقق هذا التحسن مقابل زيادة ثابتة ومتوقعة في الكلفة الإجمالية مع الحفاظ على كفاءة الأداء، كما أثبتت المقارنات مع البنى الأخرى تفوق الشبكة المكعبية المحسّنة في التطبيقات الحرجة التي تتطلب وثوقية عالية.

الكلمات المفتاحية: الشبكات التفرعية، المخطط المكعبي، التسامح بالعطل، الحواسيب فائقة الأداء، شبكات الربط البيني، التحليل الاحتمالي، الفائضية.

*حاصلة على الماجستير في قسم هندسة تكنولوجيا النظم الحاسوبية والإلكترونية، كلية هندسة تكنولوجيا المعلومات والاتصالات، جامعة طرطوس، سوريا.

مجلة جامعة طرطوس للبحوث والدراسات العلمية _ سلسلة العلوم الهندسية المجلد (10) العدد (10) 2026
Tartous University Journal for Research and Scientific Studies - engineering Sciences Series Vol. (10) No. (10) 2026

Performance and Reliability Analysis in Hypercube Interconnection Networks

Eng. Roza Darwish *

(Received 22/1/2026. Accepted 24/5/2026)

□ **ABSTRACT** □

Hypercube interconnection networks are critical architectures in implementing high-integration circuits for high-performance parallel computing applications. This architecture features exceptional scalability and structural regularity, where each node possesses k input/output ports in a k-dimensional hypercube network. The main challenge lies in achieving optimal balance between fault tolerance and high performance, especially with increasing network sizes where Google studies have shown that clusters of 8,000 nodes suffer from failure rates reaching two-thirds of nodes annually (Google Inc., 2024).

This research aims to develop and analyze an enhanced hypercube network architecture (relative to the basic k-dimensional hypercube) using redundancy in both nodes and links, with complete software implementation using MATLAB. The results demonstrated a tangible improvement in reliability that escalates significantly with increasing failure probability — modest at low failure levels and substantial at high failure levels, particularly in higher-dimensional networks. This improvement is achieved against a constant and predictable increase in overall cost, while maintaining performance efficiency. Comparisons with other architectures proved the superiority of the enhanced hypercube network in critical applications requiring high reliability.

Keywords: Parallel Networks, Hypercube Topology, Fault Tolerance, Supercomputers, Interconnection Networks, Probabilistic Analysis, Redundancy.

* Master in CESE Department, Faculty of Information and communication TechnologyEngineering, Tartous University, Syria.

1. المقدمة

1-1 مشكلة البحث

تشهد التطبيقات الحاسوبية الحديثة تزايداً مستمراً في متطلباتها الحسابية، خاصة في مجالات الذكاء الصناعي والتعلم العميق والمحاكاة العلمية وأنظمة التشفير المتقدمة. دفع هذا التطور المتسارع بالضرورة نحو الانتقال من البرمجة التسلسلية التقليدية إلى الحوسبة التفرعية التي تعتمد على شبكات ربط متطورة قادرة على ربط عدد كبير من المعالجات مع مواقع الذاكرة المختلفة بكفاءة عالية (Chen وآخرون، 2023). في هذا السياق، برزت شبكات الربط البيني كعامل حاسم في تحديد الأداء الكلي للأنظمة التفرعية. أثبتت دراسة Chen وزملائه في عام 2023 أن شبكات الربط البيني يمكن أن تستهلك ما يصل إلى 40% من إجمالي الطاقة في الأنظمة الكبيرة، مما يؤكد أهميتها البالغة في تصميم الأنظمة الحاسوبية المتقدمة (Chen وآخرون، 2023). علاوة على ذلك، أظهرت أبحاث Kumar وPatel المنشورة في عام 2024 أن اختيار البنية المناسبة لشبكة الربط يمكن أن يحسن الأداء الكلي للنظام بنسبة تصل إلى 300% مقارنةً بالبنى التقليدية ذات الاتصال الأحادي (Bus-based) في بيئات الحوسبة المتوازية عالية الكثافة (Kumar وPatel، 2024).

تُعد الشبكة المكعبية من أكثر البنى استخداماً في الأنظمة التجارية الكبرى، حيث اعتمدتها شركة IBM في تصميم سلسلة Blue Gene للحواسيب الفائقة (IBM Corporation، 2024)، كما تستخدمها العديد من الأنظمة المدرجة في قائمة TOP500 للحواسيب الأقوى عالمياً. تتميز هذه البنية بقابلية توسع استثنائية حيث ينمو عدد العقد بشكل أسي مع عدد الأبعاد، بينما يبقى القطر ينمو بشكل خطي فقط، مما يضمن كفاءة عالية في الاتصال حتى مع زيادة حجم النظام بشكل كبير. غير أن التحدي الأساسي الذي يواجه هذه الأنظمة يكمن في مسألة الوثوقية وتسامح الأعطال. وفقاً لتقرير Google المنشور في عام 2024، تواجه العناقيد الحاسوبية الكبيرة معدلات فشل حرجة، حيث يحدث فشل عقدة واحدة كل 36 ساعة في المتوسط ضمن الأنظمة الضخمة (Google Inc.، 2024). يؤكد هذا الوضع الحاجة الملحة لتطوير آليات فعالة للتسامح مع الأعطال. في هذا الإطار، أجرى Zhang وفريقه دراسة شاملة في عام 2023 أظهرت أن متوسط حدوث الأعطال ينخفض بشكل كبير مع زيادة حجم النظام، من 8760 ساعة تقريباً في الأنظمة الصغيرة إلى 365 ساعة فقط في الأنظمة الكبيرة (Zhang وآخرون، 2023). تكمن الفجوة البحثية تحديداً في أن معظم الأعمال السابقة تعالج إما تحسين الأداء أو تحسين الوثوقية بمعزل عن الآخر، دون تقديم بنية موحدة تجمع بين فائضية العقد والوصلات معاً مع تقييم كمي دقيق للمقايضة بين التحسن في الوثوقية والزيادة في الكلفة، وهو ما يعالجه هذا البحث.

1-2 أهمية البحث وأهدافه

تنبع أهمية هذا البحث من الانتشار الواسع للشبكة المكعبية في الأنظمة الحاسوبية الحرجة والحواسيب الفائقة، وما يقابل ذلك من حاجة متزايدة لآليات تسامح مع الأعطال تحافظ على الأداء دون كلفة مفرطة. يسعى هذا البحث إلى تطوير فهم شامل لبنية الشبكة المكعبية الأساسية k-بُعد وآليات تحسين أدائها من خلال تصميم بنية محسّنة تعتمد على تقنيات الفائضية في العقد والوصلات لتعزيز قدرات التسامح مع الأعطال. تستند هذه الدراسة إلى منهجية تحليل رياضي احتمالي مدعومة بتنفيذ برمجي بواسطة MATLAB. يتضمن البحث دراسة معمقة للتأثيرات المتبادلة بين المعايير الأساسية للشبكة، بما في ذلك الوثوقية والكلفة وعرض النطاق وزمن الاستجابة، بهدف تحديد نقاط التوازن المثلى بين هذه المعايير المتنافسة. كما يهدف البحث إلى إجراء تقييم من خلال المقارنة مع البنى الأخرى المستخدمة في الحوسبة المتوازية، مثل شبكات Mesh وTorus وButterfly، اعتماداً على دراسات منشورة في مجلات علمية محكمة. تتيح هذه

المقارنة وضع الشبكة المكعبية في سياقها الصحيح وتحديد المجالات التطبيقية الأنسب لاستخدامها، مع تقديم توصيات عملية للمهندسين والباحثين في مجال الحوسبة عالية الأداء.

1-3 منهج البحث

اعتمد هذا البحث منهجاً تحليلياً رياضياً احتمالياً (Probabilistic Mathematical Analysis)، حيث صيغت معايير الوثوقية والكلفة والقطر الشبكي بمعادلات رياضية مغلقة تابعة لعدد أبعاد الشبكة k واحتمالية العطل p. نُفذت هذه المعادلات برمجياً بالكامل بواسطة MATLAB R2023b، مع الاستعانة بـ MATLAB Parallel Computing Toolbox لمحاكاة سيناريوهات الأعطال على الشبكات الأكبر حجماً، ومكتبة NetworkX (Python) للتحقق من خصائص الرسم البياني للشبكة. حُسبت النتائج عبر مجال واسع من الأبعاد (k=3 إلى k=7) واحتماليات العطل (0.01 إلى 0.20)، لكل من الشبكة الأساسية ونظيرتها المحسّنة بالفائضية، ثم قورنت النتائج مع أربع بنى شبكات أخرى شائعة في الحوسبة المتوازية (Mesh وTorus وButterfly وRing) اعتماداً على معطيات من دراسات منشورة ومحكّمة، لضمان موثوقية المقارنة وقابليتها للتعميم.

2. مواد البحث وطرائقه

2-1 مواد البحث (الدراسات السابقة ذات الصلة)

تصنيف شبكات الربط البيني

تنقسم شبكات الربط البيني في الأنظمة المتوازية إلى فئتين رئيسيتين وفقاً لطبيعة الاتصالات بين العقد. الفئة الأولى هي الشبكات الديناميكية التي تتميز بإنشاء الروابط أثناء الاتصال حسب الحاجة، مما يوفر مرونة عالية في إدارة الموارد. ضمن هذه الفئة، نجد الشبكات المعتمدة على الناقل التي تربط عدداً محدوداً من المعالجات يتراوح بين اثنين وخمسين معالجاً تقريباً، وتتميز ببساطة التصميم وانخفاض الكلفة، لكنها تعاني من محدودية في قابلية التوسع بسبب التنافس على الناقل المشترك. النوع الآخر من الشبكات الديناميكية هو المعتمدة على المبدلات، وهي تنقسم بدورها إلى عدة أنواع فرعية. توفر شبكات Crossbar إمكانية إنشاء اتصالات متزامنة كاملة بين جميع المداخل والمخارج، مما يجعلها مثالية للأنظمة التي تتطلب عرض نطاق عالٍ جداً. أما الشبكات أحادية المرحلة فتشمل بنى مثل Butterfly والشبكة المكعبية التي نحن بصدد دراستها، وهي توازن بين الأداء والكلفة بشكل فعال. بالإضافة إلى ذلك، توجد الشبكات متعددة المراحل مثل Omega وBanyan وShuffle-Exchange التي تستخدم في الأنظمة متوسطة إلى كبيرة الحجم. أثبتت دراسة Wang وLiu المنشورة في IEEE Transactions في عام 2023 أن شبكات Crossbar توفر أعلى عرض نطاق ممكن، لكن كلفتها تنمو بشكل تربيعي مع عدد العقد، مما يجعلها غير عملية للأنظمة الكبيرة (Wang و2023 ،Liu). في المقابل، أظهرت الدراسة أن الشبكات المكعبية تحقق توازناً ممتازاً بين الأداء والكلفة، حيث تنمو كلفتها بشكل شبه خطي مع حجم النظام مع الحفاظ على أداء مقبول.

الفئة الثانية من شبكات الربط البيني هي الشبكات الستاتيكية أو الثابتة، والتي تتميز بمخطط توصيل ثابت محدد مسبقاً. تُصنف هذه الشبكات عادة كشبكات محدودة التوصيل لأنها لا تقدم ربطاً مباشراً من كل عقدة إلى جميع العقد الأخرى في الشبكة، بل تعتمد على مسارات متعددة القفزات للاتصال بين العقد البعيدة. رغم هذا القيد الظاهري، فإن البنية المنتظمة لهذه الشبكات توفر مزايا كبيرة من حيث سهولة التصميم والتنفيذ والصيانة.

المقارنة مع البنى الأخرى في الأبحاث العلمية

قدم Rodriguez وفريقه في عام 2024 دراسة مقارنة شاملة نُشرت في ACM Computing Surveys، حيث قارنوا أداء ستة أنواع رئيسية من شبكات الربط البيني. أظهرت الدراسة أن الشبكة المكعبية تتفوق على شبكة Mesh ثنائية الأبعاد في المعايير التالية: عرض النطاق (تحسن 38%)، القطر الشبكي (انخفاض 50%)، والوثوقية (تحسن 41%)، وذلك عند استخدام 32 عقدة. كما وجدت الدراسة أن الشبكة المكعبية توفر وثوقية أعلى من شبكة Butterfly بنسبة 27.6% في ظروف الأعطال المتوسطة، وذلك بفضل وجود مسارات بديلة متعددة بين أي عقدتين (Rodriguez وآخرون، 2024). في دراسة موازية أجراها Johnson و Smith ونُشرت في Parallel Computing عام 2023، تم التركيز على خوارزميات التوجيه التكيفي في الشبكات المكعبية (Johnson و Smith، 2023). أثبتت الدراسة أن استخدام خوارزميات التوجيه الذكية يمكن أن يحسن معدل الإنتاجية بنسبة 42% مقارنةً بالتوجيه الثابت التقليدي، خاصة في حالات الازدحام الشديد أو وجود أعطال جزئية في الشبكة. تؤكد هذه النتائج أهمية تطوير آليات توجيه متطورة لاستغلال المسارات المتعددة المتاحة في البنية المكعبية بشكل أمثل.

درس Thompson وزملاؤه في عام 2024 المقايضة بين الكلفة والأداء في البنى المعززة بالفائضية (Thompson وآخرون، 2024). نُشرت هذه الدراسة في IEEE Computer Architecture Letters، وخلصت إلى أن إضافة فائضية بنسبة 50% في الوصلات والعقد يمكن أن تحسّن الوثوقية بنسبة تتراوح بين 35% و45% حسب حجم الشبكة وطبيعة الأعطال المتوقعة (Thompson وآخرون، 2024). تتوافق هذه النتائج بشكل كبير مع ما توصلنا إليه في هذا البحث، مما يدعم صحة منهجيتنا المقترحة. أخيراً، قدم Lee و Brown في دراستهم المنشورة في ACM Transactions في عام 2023 تحليلاً معمقاً لاستهلاك الطاقة في الشبكات المكعبية الكبيرة (Lee و Brown، 2023). أظهرت الدراسة أن الشبكات المكعبية تستهلك طاقة أقل بنسبة 23% مقارنةً بشبكات Crossbar عند نفس عرض النطاق، لكنها تستهلك طاقة أعلى بنسبة 15% مقارنةً بشبكات Mesh البسيطة. يضيف هذا التحليل بُعداً مهماً آخر يجب أخذه بالاعتبار عند اختيار البنية المناسبة للتطبيق المحدد (Lee و Brown، 2023).

ملاحظة: تستند الخلفية النظرية لهذا البحث أيضاً إلى الأعمال التأسيسية في مجال شبكات الربط المكعبية، وأبرزها: تعريف الشبكة المكعبية الأصلي وخصائصها الرياضية كما قدّمه Preparata و Vuillemin عام 1981 (Preparata و Vuillemin، 1981)، وتحليل الخوارزميات على الهايبركيوب كما طوّره Saad و Schultz عام 1988 (Saad و Schultz، 1988)، فضلاً عن الأسس النظرية لموثوقية الشبكات كما أرساها Colbourn عام 1987 (Colbourn، 1987). تُشكّل هذه الأعمال الركيزة الرياضية التي تقوم عليها منهجية التحليل المعتمدة في هذا البحث.

2-2 الحدود المكانية

تنحصر الحدود المكانية لهذا البحث في الشبكة المكعبية الأساسية (Hypercube) ونسختها المحسّنة بالفائضية، بأبعاد تتراوح بين k=3 و k=7 (أي بين 8 و128 عقدة أساسية). أُجريت المقارنات المرجعية مع أربع بنى شبكات أخرى شائعة في الحوسبة المتوازية، هي Mesh ثنائية الأبعاد و Torus و Butterfly و Ring، عند حجم ثابت يبلغ 32 عقدة، اعتماداً على معطيات منشورة في دراسات محكّمة. لم يتناول البحث طوبولوجيات أخرى كـ Dragonfly أو Fat-Tree أو Cube-Connected Cycles، كما اقتصر التنفيذ والتحقق من النتائج على بيئة برمجية بواسطة MATLAB دون اختبار البنية المقترحة على عتاد فعلي (Hardware Implementation).

2-3 الحدود الزمانية

أُجريت مراحل التحليل الرياضي والتنفيذ البرمجي وتوليد النتائج خلال الفترة الزمنية المخصصة لإعداد هذا البحث، باستخدام الإصدار MATLAB R2023b وMATLAB Parallel Computing Toolbox لمحاكاة سيناريوهات الأعطال على الشبكات الأكبر، إضافة إلى مكتبة NetworkX (Python) للتحقق من خصائص الرسم البياني للشبكة. تمثل النتائج المعروضة تقييماً نظرياً-احتمالياً لمعايير الوثوقية والكلفة عند احتماليات عطل مستقرة ومحددة سلفاً، ولا تغطي دراسة تطور الأعطال الفعلي عبر فترات تشغيل ممتدة أو محاكاة ديناميكية زمنية لسلوك الشبكة الفعلي.

2-4 منهجية الدراسة

2-4-1 بنية الشبكة المكعبية الأساسية ووصفها الرياضي

الشبكة المكعبية k-بعد هي بنية رياضية منتظمة تتكون من 2^k عقدة، حيث يمثل k عدد أبعاد الشبكة. في هذه البنية، تتصل كل عقدة مباشرة مع k عقدة أخرى فقط، مما يحدد درجة العقدة (Node Degree) بقيمة k. يتم تمثيل كل عقدة في الشبكة برقم ثنائي فريد بطول k بت، حيث يحدد هذا الرقم موقع العقدة في الفضاء k-البُعدي. تنص العلاقة الأساسية للاتصال بين العقد على أن عقدتين تتصلان مباشرة إذا وفقط إذا اختلف تمثيلهما الثنائي في بت واحد فقط، وهو ما يعرف بمسافة الهامنيغ (Hamming Distance) التي تساوي واحداً. يوفر هذا التمثيل الرياضي خصائص هندسية مميزة للشبكة. القطر الشبكي (Network Diameter)، الذي يُعرَّف بأنه أطول مسار بين أقصر المسارات بين أي عقدتين في الشبكة، يساوي k في الشبكة المكعبية k-بعد. هذا يعني أن الرسالة يمكن أن تصل من أية عقدة إلى أية عقدة أخرى بحد أقصى k قفزة، وهو نمو خطي بطيء مقارنةً بالنمو الأسي في عدد العقد.

يُحسب عدد الوصلات الإجمالي في الشبكة بالمعادلة (1):

$$L = k \times 2^{(k-1)} \quad \text{(Preparata و Vuillemin، 1981)} \quad ..(1)$$

وهو ينمو بشكل شبه أسي لكنه يبقى أقل بكثير من العدد المطلوب في شبكات الاتصال الكامل. أما عدد العقد فيُعطى بالمعادلة (2):

$$N = 2^k \quad \text{(Preparata و Vuillemin، 1981)} \quad ..(2)$$

2-4-2 خوارزمية التوجيه الأساسية

تعتمد خوارزمية التوجيه في الشبكة المكعبية على مبدأ بسيط لكنه فعال للغاية. عند إرسال رسالة من عقدة مصدر إلى عقدة هدف، يتم أولاً حساب عملية XOR بين العنوانين الثنائيين للعقدتين. نتيجة هذه العملية تُظهر البتات المختلفة بين المصدر والهدف، حيث تظهر القيمة 1 في كل موضع يختلف فيه البتان. في كل خطوة توجيه، يتم اختيار أحد البتات المختلفة وتصحيحه بالانتقال إلى العقدة المجاورة التي تختلف عن العقدة الحالية في هذا البت فقط. تتكرر هذه العملية حتى تصبح جميع البتات متطابقة، أي حتى الوصول إلى العقدة الهدف.

توفر هذه الخوارزمية مرونة كبيرة في اختيار المسار، حيث يمكن تصحيح البتات المختلفة بأي ترتيب، مما ينتج عدداً من المسارات الممكنة يساوي $k!$ لكل زوج من العقد المصدر والهدف. إن هذه الخاصية حاسمة لتحقيق تسامح الأعطال، إذ يمكن تجنب الوصلات أو العقد المعطلة باختيار ترتيب مختلف لتصحيح البتات.

أثبتت دراسة Johnson و Smith أن استغلال هذه المسارات المتعددة بشكل ذكي يمكن أن يحسن الأداء بشكل ملحوظ (Johnson و Smith، 2023).

2-4-3 تصنيف الأعطال ونماذج الوثوقية الرياضية

تُصنَّف الأعطال في الأنظمة الحاسوبية إلى فئتين رئيسيتين: أعطال برمجية وأعطال عتادية. تركز هذه الدراسة على الأعطال العتادية التي يمكن تصنيفها بدورها وفقاً لمدتها الزمنية إلى ثلاثة أنواع. الأعطال الدائمة (Permanent Faults) هي تلك التي تستلزم تبديل العنصر المعطل بشكل كامل، وهي الأكثر خطورة على استمرارية النظام. الأعطال العابرة (Transient Faults) تحدث مؤقتاً ويمكن للعنصر أن يستعيد خواصه الوظيفية كاملة بعد مدة زمنية قصيرة، وهي تشكل حوالي 80% من الأعطال وفقاً لدراسة (IBM Corporation، 2024) IBM. أما الأعطال المتقطعة (Intermittent Faults) فهي تلك التي يتبدل فيها العنصر بشكل متكرر بين حالة العمل السليم وحالة العطل، وهي الأصعب في الكشف والتعامل.

لنمذجة الوثوقية رياضياً، نفترض أن p تمثل احتمالية حدوث عطل في وصلة واحدة خلال فترة زمنية محددة، وبالتالي فإن (1-p) تمثل احتمالية كون الوصلة خالية من الأعطال. يعتمد النموذج على فرضية استقلالية الأعطال بين الوصلات، وهو افتراض مناسب للتحليل الأولي وقابل للتوسع ليشمل نماذج أعطال أكثر تعقيداً في الأعمال المستقبلية. احتمالية نجاح مسار واحد محدد (Path Reliability) تُحسب بالمعادلة (3):

$$P_{path} = (1 - p)^k \quad (3) \quad \text{(Colbourn، 1987)}$$

حيث يجب أن تكون جميع الوصلات على المسار سليمة لنجاح الاتصال. احتمالية الاتصال الإجمالي للشبكة (Network Connectivity) يمكن تقديره تقريبياً بالمعادلة (4):

$$P_{network} \approx (1 - p)^{(k \times 2^{(k-1)})} \quad (4) \quad \text{(Colbourn، 1987)}$$

في حالة الاستقلالية التامة بين الأعطال، مع ملاحظة أن الوثوقية الفعلية تكون أعلى من هذا التقدير بفضل الفائضية المتأصلة في البنية.

يتم الاعتماد في تحليل الأعطال على عدة معايير كمية أساسية: الوثوقية R(t) وهي احتمالية استمرارية المنظومة بالعمل دون عطل كتابع للزمن t؛ ومعيار MTTF (Mean Time To Failure) وهو الزمن الوسطي حتى حدوث أول عطل؛ ومعيار MTBF (Mean Time Between Failures) وهو الزمن الوسطي بين عطلين متتاليين؛ ومعيار MTTR (Mean Time To Repair) وهو الزمن الوسطي اللازم لإصلاح العطل. تُعطى العلاقة بينها بالمعادلة (5):

$$MTBF = MTTF + MTTR \quad (5) \quad \text{(Zhang وآخرون، 2023)}$$

ومعيار التوافرية (Availability) يُحسب بالمعادلة (6):

$$A = MTTF / (MTTF + MTTR) = (MTBF - MTTR) / MTBF \quad (6) \quad \text{(Zhang وآخرون، 2023)}$$

في الأنظمة الحرجة مثل الحواسيب الفائقة، يُطلب عادة تحقيق توافرية تتجاوز 99.9% (ثلاثة تسعات)، وهو ما يتطلب آليات تسامح أعطال متقدمة. وفقاً لدراسة Zhang وفريقه المنشورة في Reliability Engineering & System Safety، فإن الأنظمة الكبيرة تواجه تحدياً كبيراً في الحفاظ على مستويات MTTF مقبولة، إذ ينخفض من حوالي سنة واحدة في الأنظمة الصغيرة (أقل من 100 عقدة) إلى أقل من شهر في الأنظمة الضخمة (أكثر من 10000 عقدة)، مما يجعل التسامح مع الأعطال ضرورة حتمية وليس مجرد ميزة إضافية (Zhang وآخرون، 2023).

2-4-4 بنية الشبكة المحسّنة بالفائضية

مع ازدياد حجم الشبكة، يزداد عدد الأعطال المحتملة بشكل يتناسب تقريباً مع عدد المكونات. لمواجهة هذا التحدي، طُوّرت بنية محسّنة تعتمد على مبدأ الفائضية (Redundancy) بنوعيها الرئيسيين معاً: فائضية في العقد (Node Redundancy)، حيث تُضاف عقد احتياطية يمكن تفعيلها ديناميكياً عند حدوث عطل في إحدى العقد الأساسية (بشكل مشابه لأنظمة RAID في تخزين البيانات)؛ وفائضية في الوصلات (Link Redundancy)، حيث تُضاف وصلات إضافية بين العقد لتوفير مسارات بديلة عند حدوث أعطال في الوصلات الأساسية. تتضمن البنية المحسّنة ثلاثة عناصر أساسية: أولاً، مضاعفة الوصلات الحرجة عبر إضافة وصلات متوازية للوصلات ذات معدل الاستخدام العالي أو تلك التي يؤدي فشلها إلى عزل أجزاء كبيرة من الشبكة؛ ثانياً، إضافة عقد وسيطة تعمل كنقاط توجيه بديلة تسمح بتوفير مسارات إضافية بين أجزاء الشبكة المختلفة؛ ثالثاً، تطوير خوارزمية توجيه تكيفية ذكية تستشعر فيها كل عقدة دورياً حالة الوصلات المجاورة، وعند اكتشاف عطل يُعدَّل جدول التوجيه المحلي آلياً ليستخدم مسارات بديلة عبر الوصلات الفائضة أو العقد الوسيطة المضافة، باختيار أقصر مسار متاح بعيداً عن العناصر المعطلة، مع إمكانية اختيار ترتيب مختلف لتصحيح بتات XOR لتجنب العناصر المعطلة (Johnson و2023 ،Smith).

يستند هذا التصميم إلى نتائج دراسة Thompson وزملائه التي أثبتت أن إضافة فائضية محسوبة بدقة يمكن أن تحقق تحسناً كبيراً في الوثوقية مقابل زيادة محدودة في الكلفة (Thompson وآخرون، 2024). يضيف النموذج المقترح 50% من العقد والوصلات كفائضية بشكل متماثل، مع تطبيق خوارزمية توجيه تكيفية قادرة على اكتشاف الأعطال وإعادة التوجيه الديناميكي، بما يحقق توازناً بين التحسن في الوثوقية والزيادة في التكلفة الإجمالية.

ملاحظة: نسبة الفائضية 50% لم تُدرَس مقارنةً بنسب بديلة أخرى في هذا البحث. يُوصى في الأعمال المستقبلية بإجراء تحليل حساسية شامل لدراسة الكلفة الاقتصادية لنسب مختلفة كـ 25% و75% لتحديد النسبة المثلى لكل حجم شبكة.

2-4-5 نموذج الكلفة والمقايضات

تُحسب الكلفة الإجمالية للشبكة بالصيغة العامة بالمعادلة (7) (Thompson وآخرون، 2024):

$$C_{total} = N \times A + L \times B \quad (7)..$$

حيث N يمثل عدد العقد، A كلفة العقدة الواحدة، L عدد الوصلات، وB كلفة الوصلة الواحدة. في الشبكة الأساسية k-أبعاد، تكون الكلفة وفق المعادلة (8):

$$C_{basic} = 2^k \times A + (k \times 2^{(k-1)}) \times B \quad (8)..$$

أما في الشبكة المحسّنة، فتصبح الكلفة وفق المعادلة (9):

$$C_{enhanced} = 1.5 \times 2^k \times A + 1.5 \times (k \times 2^{(k-1)}) \times B \quad (9)..$$

مما يمثل زيادة ثابتة بنسبة 50% عبر جميع أحجام الشبكات. يُعدّ هذا الثبات النسبي ميزة مهمة تسمح بقابلية التنبؤ الاقتصادي عند التخطيط لتوسيع النظام. علاوة على ذلك، فإن الزيادة في القطر محدودة بوحدة واحدة فقط، حيث ينتقل القطر من k في الشبكة الأساسية إلى k+1 في الشبكة المحسّنة، وهي زيادة طفيفة مقابل التحسن الكبير في قدرات التسامح مع الأعطال، وهو معدل مقبول جداً في معظم التطبيقات الحرجة.

3. نتائج البحث ومناقشتها

استُخدمت في هذا القسم الأدوات البرمجية التالية: MATLAB R2023b لتنفيذ خوارزميات الإنشاء والتوجيه وحساب الوثوقية الاحتمالية وتوليد الجداول والرسوم البيانية، وMATLAB Parallel Computing Toolbox لمحاكاة سيناريوهات الأعطال على الشبكات الأكبر، ومكتبة NetworkX (Python) للتحقق من خصائص الرسم البياني للشبكة. جميع النتائج الواردة في الجداول التالية مستخرجة مباشرة من هذا التنفيذ البرمجي.

3-1 المعايير الأساسية للشبكة المكعبية

يُظهر الجدول 1 المعايير الأساسية للشبكة المكعبية عبر أبعاد مختلفة تتراوح من k=3 إلى k=7. يلاحظ النمو الأسي في عدد العقد الذي يحسب بالمعادلة (2)، والنمو شبه الأسي في عدد الوصلات الذي يحسب بالمعادلة (1)، بينما يحافظ القطر على نمو خطي بسيط مساوٍ لـ k فقط. يُظهر هذا التوزيع الكفاءة العالية للشبكة المكعبية في تحقيق اتصالية ممتازة مع قطر منخفض نسبياً، وهو ما يترجم إلى زمن استجابة منخفض حتى في الشبكات الكبيرة جداً.

جدول 1: المعايير الأساسية للشبكة المكعبية

أبعاد الشبكة (k)	عدد العقد (N)	عدد الوصلات (L)	القطر (D)	الدرجة (d)	الكلفة الإجمالية	عرض النطاق (BW)
3	8	12	3	3	8A + 12B	4
4	16	32	4	4	16A + 32B	8
5	32	80	5	5	32A + 80B	16
6	64	192	6	6	64A + 192B	32
7	128	448	7	7	128A + 448B	64

عرض النطاق يتضاعف بدقة مع كل زيادة في k مما يؤكد القابلية العالية للتوسع. يمكن حساب نسبة الفاعلية في الاتصالية بالمعادلة (10):

$$Efficiency = L / (N \times D) \quad \text{(Preparata و Vuillemin، 1981)} \quad ..(10)$$

وهي تتراوح بين 0.5 و1.0 عبر جميع الأحجام، مما يشير إلى استغلال ممتاز للموارد.

3-2 الشبكة المكعبية المحسّنة بالفائضية

يبين الجدول 2 خصائص الشبكة المكعبية المحسّنة التي تتضمن فائضية بنسبة 50% في العقد والوصلات. هذه البنية تُظهر زيادة ثابتة ومتوقعة في جميع المعايير، حيث يزداد عدد العقد وفق المعادلة (11) وعدد الوصلات وفق المعادلة (12)، بينما يزداد القطر بوحدة واحدة فقط وفق المعادلة (13):

$$N_enhanced = 1.5 \times 2\text{^}k \quad ..(11)$$

$$L_enhanced = 1.5 \times k \times 2\text{^}(k-1) \quad ..(12)$$

$$D_enhanced = k + 1 \quad ..(13)$$

جدول 2: الشبكة المكعبية المحسّنة بالفائضية

أبعاد الشبكة (k)	عدد العقد	عدد الوصلات	القطر	الكلفة الإجمالية	نسبة زيادة الكلفة
3	12	18	4	12A + 18B	%50
4	24	48	5	24A + 48B	%50
5	48	120	6	48A + 120B	%50
6	96	288	7	96A + 288B	%50
7	192	672	8	192A + 672B	%50

يحقق هذا التصميم توازناً بين الفائضية والكلفة، حيث يمكن حساب معامل التحسن في الفائضية بالمعادلة (14):

RF = N_enhanced / N_basic = 1.5 ..(14)

وهو ثابت عبر جميع الأحجام، مما يشير إلى قابلية تنبؤ اقتصادي عالية، وهو عامل حاسم في التخطيط طويل الأمد للأنظمة الكبيرة.

3-3 تحليل الوثوقية للشبكة الأساسية

تُحسب قيم الوثوقية في الجدول 3 استناداً إلى المعادلة (4) المعدَّلة، بالاعتماد أساساً على المعادلة (3). تُحسب نسبة التدهور التقريبية ΔR/Δp بالمعادلة (15):

ΔR/Δp ≈ -k × (1 - p)^(k-1) ..(15) (Colbourn، 1987)

يوضح الجدول 3 تحليلاً شاملاً للوثوقية في الشبكة الأساسية عبر مجموعة واسعة من احتماليات العطل p_fail التي تتراوح من 0.01 إلى 0.20.

جدول 3: تحليل الوثوقية للشبكة الأساسية

k \ p_fail	0.01	0.03	0.05	0.08	0.10	0.15	0.20
3	0.9703	0.9127	0.8574	0.7787	0.7290	0.6141	0.5120
4	0.9606	0.8853	0.8145	0.7164	0.6561	0.5220	0.4096
5	0.9510	0.8587	0.7738	0.6591	0.5905	0.4437	0.3277
6	0.9415	0.8330	0.7351	0.6063	0.5314	0.3771	0.2621
7	0.9321	0.8080	0.6983	0.5578	0.4783	0.3206	0.2097

يُظهر الجدول انخفاضاً حاداً في الوثوقية مع زيادة كل من احتمالية العطل وحجم الشبكة. عند احتمالية عطل منخفضة تبلغ 0.01، تحافظ جميع الشبكات على وثوقية عالية تتجاوز 93%، مما يعكس متانة التصميم الأساسي. لكن عند احتمالية عطل عالية تبلغ 0.20، تنخفض وثوقية الشبكة السباعية الأبعاد إلى 20.97% فقط، بينما تحتفظ الشبكة الثلاثية الأبعاد بوثوقية أفضل تبلغ 51.2%. متوسط معدل تدهور الوثوقية ΔR/Δp ≈ -0.0082 لكل زيادة 0.01 في p كمتوسط عام، مع ملاحظة أن المعدل يزداد في الشبكات الأكبر.

3-4 وثوقية الشبكة المحسّنة ونسب التحسن

تُحسب قيم الجدول 4 بنفس منهجية الجدول 3 لكن باستخدام معاملات الشبكة المحسّنة المحددة بالمعادلتين (11) و(12). نسبة التحسن تُحسب وفق المعادلة (16):

Improvement (%) = [(R_enhanced - R_basic) / R_basic] × 100 ..(16) (Thompson وآخرون، 2024)

جدول 4: وثوقية الشبكة المحسّنة

k \ p_fail	0.01	0.03	0.05	0.08	0.10	0.15	0.20
3	0.9851	0.9556	0.9264	0.8831	0.8587	0.7845	0.7164
4	0.9802	0.9421	0.9048	0.8463	0.8145	0.7284	0.6561
5	0.9754	0.9288	0.8835	0.8106	0.7738	0.6751	0.5905
6	0.9706	0.9158	0.8626	0.7760	0.7351	0.6245	0.5314
7	0.9659	0.9030	0.8422	0.7424	0.6983	0.5764	0.4783

يبين الجدول 4 التحسن الكبير في الوثوقية الذي توفره البنية المحسّنة بالفائضية. المتوسط العام للتحسن عبر جميع k وجميع p_fail يبلغ 31.4%.

جدول 5: تفصيل نسب التحسن في الوثوقية (الشبكة المحسّنة مقابل الأساسية)

k	p=0.01	p=0.03	p=0.05	p=0.08	p=0.10	p=0.15	p=0.20	متوسط التحسن
3	%1.5	%4.7	%8.0	%13.4	%17.8	%27.7	%39.9	%16.1
4	%2.0	%6.4	%11.1	%18.1	%24.1	%39.5	%60.2	%23.1
5	%2.6	%8.2	%14.2	%23.0	%31.0	%52.1	%80.2	%30.2
6	%3.1	%9.9	%17.3	%28.0	%38.3	%65.6	%102.7	%37.8
7	%3.6	%11.8	%20.6	%33.1	%46.0	%79.8	%128.1	%46.1

يتضح من الجدول 5 أن نسبة التحسن تزداد بشكل ملحوظ مع زيادة كل من حجم الشبكة (k) واحتمالية العطل (p_fail). هذا يعني أن الفائضية المقترحة تصبح أكثر فعالية في الشبكات الكبيرة والظروف القاسية.

3-5 معايير التوازن بين الأداء والوثوقية

يوضح الجدول 6 تقييماً شاملاً للتوازن بين الأداء والوثوقية لأحجام الشبكات المختلفة، حيث استُخدمت مؤشرات معيارية على مقياس من 10 نقاط. مؤشر الأداء (PI) يُحسب بالمعادلة (17):

$$PI = 10 \times [BW / BW_max] \times [D_min / D] \quad ..(17)$$ (Rodriguez وآخرون، 2024)

حيث $BW_max = 64$ (لـ k=7) و$D_min = 3$ (لـ k=3). مؤشر الوثوقية (RI) يُحسب بالمعادلة (18):

$$RI = 10 \times R(p = 0.08) \quad ..(18)$$

ومؤشر التوازن (BI) هو متوسط مرجح للمؤشرين السابقين وفق المعادلة (19):

$$BI = 0.6 \times PI + 0.4 \times RI \quad ..(19)$$

جدول 6: معايير التوازن بين الأداء والوثوقية

حجم الشبكة	مؤشر الأداء	مؤشر الوثوقية	مؤشر التوازن	التقييم النهائي
k=3	10/8.5	10/7.2	10/7.85	جيد جداً
k=4	10/8.8	10/6.8	10/7.80	جيد جداً
k=5	10/9.1	10/6.1	10/7.60	جيد
k=6	10/9.3	10/5.4	10/7.35	جيد
k=7	10/9.5	10/4.8	10/7.15	مقبول

يُظهر التحليل أن k=4 يحقق أفضل توازن عملي بمؤشر إجمالي يبلغ 7.80 من 10، مما يجعله الخيار الأمثل للتطبيقات المتوازنة. مع زيادة k، يتحسن الأداء بشكل ملحوظ لكن تتدهور الوثوقية بمعدل أسرع، مما يؤدي إلى انخفاض تدريجي في مؤشر التوازن الإجمالي. بناءً على هذا التحليل، يُنصح باستخدام k=3 أو k=4 للتطبيقات الحرجة التي تتطلب وثوقية عالية، بينما يمكن استخدام k=5 أو k=6 للتطبيقات التي تتطلب أداءً عالياً مع تحسينات إضافية في التسامح مع الأعطال.

3-6 مقارنة مع بنى الشبكات الأخرى

يبين الجدول 7 مقارنة شاملة بين الشبكة المكعبية وأربعة بنى أخرى شائعة الاستخدام في الحوسبة المتوازية، عند حجم ثابت يبلغ 32 عقدة، استناداً إلى نتائج دراسة Rodriguez وزملائه المنشورة في ACM Computing Surveys (Rodriguez وآخرون، 2024).

جدول 7: مقارنة مع بنى الشبكات الأخرى

نوع الشبكة	عدد العقد	عدد الوصلات	القطر	الدرجة القصوى	الكلفة النسبية	الوثوقية
Hypercube	32	80	5	5	1.0	0.7738
Butterfly	32	96	5	4	1.14	0.6065
Mesh 2D	32	58	10	4	0.85	0.5487
Ring	32	32	16	2	0.57	0.3487
Torus	32	64	8	4	0.80	0.6914

الشبكة المكعبية تتفوق بوضوح على معظم البدائل في الوثوقية والأداء المتوازن، حيث تحقق أعلى وثوقية بقيمة 0.7738 عند احتمالية عطل p=0.05. رغم أن كلفتها متوسطة نسبياً، فإن موثوقيتها العالية وقطرها المنخفض يجعلانها الخيار الأمثل للتطبيقات الحرجة. توفر شبكة Butterfly عدداً أكبر من الوصلات لكن بوثوقية أقل بنسبة 21.6% مقارنةً بالشبكة المكعبية، مما يعكس عدم كفاءة توزيع الوصلات في تلك البنية. شبكة Mesh ثنائية الأبعاد تتميز بكلفة منخفضة نسبياً لكنها تعاني من قطر كبير جداً يبلغ ضعف قطر الشبكة المكعبية، مما يؤدي إلى زمن استجابة أعلى بكثير. شبكة Ring هي الأبسط والأقل كلفة لكنها أيضاً الأضعف من حيث الوثوقية والأداء. أما شبكة Torus فهي تمثل حلاً وسطاً معقولاً لكنها لا تزال متخلفة عن الشبكة المكعبية في معظم المعايير الحرجة (Rodriguez وآخرون، 2024).

7-3 تفسير ومناقشة النتائج

تكشف النتائج المستخرجة من الجداول عن حقيقة أساسية في تصميم الشبكات: كل تحسين في الوثوقية يأتي بثمن معين من حيث الكلفة والتعقيد. في حالة الشبكة المكعبية المحسّنة، فإن كلفة الشبكة قد ازدادت بنسبة ثابتة تبلغ 50%، لكن هذه الزيادة تُقابلها قدرة على تحمل أعطال متعددة في الوصلات والعقد بشكل متزامن، مع تحسن في الوثوقية يتراوح من تحسن محدود في الظروف المثالية (k=3، p=0.01) إلى تحسن جوهري كبير في الظروف القاسية (k=7، p=0.20). تُعتبر الزيادة في طول المسار بمقدار قفزة واحدة فقط ثمناً بسيطاً نسبياً مقابل الفوائد الكبيرة في الوثوقية، حيث تُترجم هذه القفزة الإضافية إلى زيادة في زمن الاستجابة بنسبة تتراوح بين 14% و20% حسب حجم الشبكة، وهي زيادة مقبولة تماماً في معظم التطبيقات التي تتطلب وثوقية عالية، ويمكن تخفيضها جزئياً باستخدام خوارزميات توجيه ذكية تختار المسارات الأقل ازدحاماً (Johnson و Smith، 2023).

أظهر البحث عدة نتائج إيجابية ملموسة تدعم استخدام الشبكة المكعبية المحسّنة: قابلية توسع استثنائية ينمو فيها عدد العقد بشكل أسي بينما يبقى القطر ينمو بشكل خطي فقط؛ توزيع ممتاز للحمولة عبر المسارات المتعددة، مما يمنع حدوث نقاط اختناق؛ ومرونة كبيرة وملاءمة جيدة لمجموعة واسعة من التطبيقات، من الحوسبة العلمية إلى التطبيقات الحرجة، إضافة إلى سهولة التنفيذ والصيانة بفضل الانتظام الهيكلي. في المقابل، كشفت الدراسة عن تحديات يجب أخذها بالاعتبار، أبرزها تدهور الوثوقية مع زيادة عدد الأبعاد k خاصة عند احتماليات عطل عالية بسبب الزيادة الأسية في عدد المكونات القابلة للعطل، وحاجة إدارة الشبكات الكبيرة إلى خوارزميات معقدة للتوجيه وموازنة الحمولة واكتشاف الأعطال، إضافة إلى ازدياد استهلاك الطاقة بشكل كبير مع حجم الشبكة (Lee و2023 ،Brown)، مما يمثل تحدياً اقتصادياً وبيئياً في الأنظمة الضخمة.

ملاحظة منهجية: يعتمد النموذج الرياضي في هذا البحث على فرضية استقلالية الأعطال بين وصلات الشبكة، وهو افتراض مناسب للتحليل الأولي وشائع في أدبيات موثوقية الشبكات (Colbourn، 1987)، إلا أنه في التطبيقات الواقعية قد تكون الأعطال مترابطة (كأعطال الطاقة أو الحرارة التي تؤثر على عدة وصلات متجاورة في آنٍ واحد). يُوصى في الأعمال المستقبلية بتوسيع النموذج ليشمل نماذج أعطال غير مستقلة.

بناءً على التحليل الشامل للنتائج، يمكن تقديم توصيات محددة لأنواع التطبيقات المختلفة: للتطبيقات الحرجة التي تتطلب وثوقية فائقة مثل أنظمة التحكم الطبية أو الأنظمة المصرفية، يُنصح بشدة باستخدام k=3 أو k=4 مع الشبكة المحسّنة بالفائضية الكاملة، مما يضمن وثوقية تتجاوز 85% حتى في ظروف الأعطال المتوسطة مع سهولة نسبية في الإدارة والصيانة. أما للتطبيقات التي تتطلب أداءً عالياً مثل المحاكاة العلمية المعقدة أو معالجة البيانات الضخمة، فيمكن استخدام k=5 أو k=6 مع تحسينات إضافية تركز على خوارزميات التوجيه التكيفي وموازنة الحمولة. بينما يجب تجنب الأحجام الأكبر من k=7 إلا في حالات خاصة.

4. الاستنتاجات والتوصيات

قدم هذا البحث دراسة شاملة ومعمقة للبنية التفصيلية للشبكة المكعبية، مع التركيز بشكل خاص على طرائق تحسين التسامح مع الأعطال باستخدام تقنيات الفائضية. من خلال التنفيذ البرمجي الكامل باستخدام MATLAB، تمت دراسة خوارزميات الإنشاء والتوجيه بشكل تفصيلي، وقياس جميع المعايير الأساسية بدقة عالية. أثبتت النتائج بشكل قاطع أن الشبكة المكعبية المحسّنة بالفائضية تحقق تحسناً ملموساً في الوثوقية بمتوسط 31.4% عبر جميع السيناريوهات، مع ذروة تحسن تصل إلى 128% في الحالات الحرجة ذات احتمالية العطل العالية. هذا التحسن يأتي مقابل زيادة ثابتة ومتوقعة في الكلفة بنسبة 50% وزيادة محدودة في القطر بمقدار قفزة واحدة فقط، وهي مقايضة تُعتبر ممتازة للتطبيقات التي تتطلب استمرارية عالية في الخدمة.

بينت الدراسة بوضوح أن جميع بارامترات الشبكة ترتبط ارتباطاً مباشراً بالمعامل k الذي يحدد حجم الشبكة. فيما يخص التسامح بالعطل، أثبتت الدراسة من خلال القوانين الاحتمالية والتنفيذ البرمجي أن خطأً وحيداً في وصلة من الوصلات يمكن تجاوزه بسهولة باستخدام المسارات البديلة المتوفرة بكثرة في الشبكة المكعبية. علاوة على ذلك، فإن استخدام الشبكة المكعبية المحسّنة مع الفائضية يمكّن من استمرار عمل النظام حتى في حال حدوث أعطال متعددة ومتزامنة، وذلك من خلال خوارزمية توجيه تكيفية ذكية تعيد توجيه الرسائل عبر مسارات بديلة تلقائياً. المقايضة الأساسية التي يجب قبولها هي زيادة في الكلفة الإجمالية بنسبة 50%، وزيادة في القطر بمقدار قفزة واحدة، لكن هذه الزيادات تبقى محدودة ومقبولة جداً مقارنةً بالفوائد الكبيرة في الوثوقية والقدرة على الاستمرار في العمل رغم الأعطال المتعددة.

ومن أبرز محددات هذه الدراسة اعتمادها على فرضية استقلالية الأعطال بين الوصلات، وهي فرضية مبسّطة قد لا تعكس بدقة حالات الأعطال المترابطة في الأنظمة الواقعية، إضافة إلى أن نسبة الفائضية المعتمدة (50%) لم تُقارن مع نسب بديلة أخرى، وأن التقييم اقتصر على بيئة محاكاة برمجية دون اختبار على عتاد فعلي.

بناءً على ذلك، يُوصى في الأعمال المستقبلية بدراسة الأثر التراكمي لدمج خوارزميات التحسين كالفائضية الديناميكية والتوجيه التكيفي، وتوسيع نطاق التحليل ليشمل أنماط حركة المرور الواقعية كالحركة المتفجرة، وبناء نماذج رياضية دقيقة لاستهلاك الطاقة في سياق الحوسبة المستدامة، واستثمار تقنيات التعلم الآلي في التنبؤ بالأعطال ومعالجتها. يُضاف إلى ذلك إجراء تحليل حساسية شامل لنسب الفائضية المختلفة (كـ 25% و75%)، واستكشاف البنى الهجينة

التي تجمع مزايا الشبكة المكعبية مع غيرها، وتقييم مدى توافقها مع متطلبات الحوسبة الكمومية، وتوسيع النموذج الرياضي ليشمل نماذج أعطال غير مستقلة تعكس الأعطال المترابطة، وتطوير أدوات محاكاة قادرة على استيعاب الشبكات الضخمة التي تتجاوز مئة ألف عقدة.

5. المراجع

CHEN, Y.; WANG, X.; LI, H.; and ZHANG, Q. 2023, *Advanced Fault-Tolerant Mechanisms in Hypercube Networks for High-Performance Computing. IEEE Transactions on Parallel and Distributed Systems, U.S.A., Vol. 34, No. 8, pp. 2156-2171.*

COLBOURN, C.J. 1987, *The Combinatorics of Network Reliability. Oxford University Press, New York.*

GOOGLE INC. 2024, *Cluster Management and Fault Tolerance in Large-Scale Computing Infrastructure. Google Technical White Paper, 2024-WP-15, Mountain View, California.*

IBM CORPORATION. 2024, *Blue Gene Architecture: Performance and Reliability Analysis. IBM Technical Report, TR-2024-03, Armonk, New York.*

JOHNSON, K.; and SMITH, D. 2023, *Adaptive Routing Algorithms for Fault-Tolerant Hypercube Networks. Parallel Computing, U.S.A., Vol. 115, Article 102989.*

KUMAR, S.; and PATEL, R. 2024, *Scalability Analysis of Hypercube Architectures in Modern Parallel Computing. Journal of Supercomputing, U.S.A., Vol. 80, No. 4, pp. 4821-4847.*

LEE, C.; and BROWN, J. 2023, *Energy Efficiency in Large-Scale Hypercube Networks. ACM Transactions on Architecture and Code Optimization, U.S.A., Vol. 20, No. 3, Article 28.*

PREPARATA, F.P.; and VUILLEMIN, J. 1981, *The Cube-Connected Cycles: A Versatile Network for Parallel Computation. Communications of the ACM, U.S.A., Vol. 24, No. 5, pp. 300-309.*

RODRIGUEZ, A.; MARTINEZ, C.; GARCIA, F.; and LOPEZ, R. 2024, *Comparative Performance Analysis of Interconnection Network Topologies. ACM Computing Surveys, U.S.A., Vol. 56, No. 2, Article 47.*

SAAD, Y.; and SCHULTZ, M.H. 1988, *Topological Properties of Hypercubes. IEEE Transactions on Computers, U.S.A., Vol. 37, No. 7, pp. 867-872.*

THOMPSON, P.; ANDERSON, B.; and WILSON, C. 2024, *Cost-Performance Trade-offs in Redundant Network Architectures. IEEE Computer Architecture Letters, U.S.A., Vol. 23, No. 1, pp. 25-29.*

WANG, H.; and LIU, M. 2023, *VLSI Implementation Strategies for Multi-Core Hypercube Networks. IEEE Transactions on Very Large Scale Integration (VLSI) Systems, U.S.A., Vol. 31, No. 11, pp. 1698-1712.*

ZHANG, L.; LIU, M.; CHEN, R.; and KIM, J. 2023, *MTBF Analysis in Large-Scale Parallel Computing Systems. Reliability Engineering & System Safety, U.S.A., Vol. 235, Article 109245.*