

تصميم طوبولوجيا Mesh المحسنة ذات الاتصال المتكامل ودراسة خصائصها

د. بلسم عيد *

أ.د. محمد حجازية **

د. يعرب بدر ***

آدم محفوظ ****

(تاريخ الإيداع ٢٠٢٤/١٢/٣٠ . قبل للنشر في ٢٠٢٥/٤/٢٣)

□ ملخص □

تعد الشبكة Mesh أحد أكثر الشبكات المستخدمة والمطبقة في مجال الشبكات المدمجة على الشريحة (NoC) كنوع من الشبكات المربعة وتدخل الشبكة Torus في نفس السياق. معظم الدراسات الأكاديمية والتطبيقية ضمن هذا المجال اعتمدت تعديلات على طوبولوجيا Mesh نظراً للميزات التي تتوفر بها هذه الشبكة ولعل أبرزها التجانس الجيد وسهولة التصميم والقطر المنخفض وعرض الحزمة العالي، لكن تعتبر مشكلة قابلية التوسيع أحد أهم المشاكل التي تعاني منها هذه الطوبولوجيا والتي تنتج عنها زيادة في زمن التأخير. العديد من الأبحاث قدمت حلولاً لهذه المشكلة كتنطير بنية الموجه أو التعديل في خوارزميات التوجيه أو تعديل بنية الربط لهذه الشبكة. تركز هذه الورقة على تقديم حل لمشكلة ملائمة الشبكة Mesh لقابلية التوسيع والمشاكل التي تنتج عن زيادة عدد العقد وذلك من خلال التعديل في بنية الربط والتوصيل بين العقد بغية تحسين أداء وميزات الشبكة Mesh وذلك مقارنة مع شبكات Torus، C^2_Mesh ، XMesh والتي تعتبر جميعها مشتقة من الشبكة Mesh ذاتها. حققت البنية المقترحة FC-Mesh تحسناً كبيراً في الأداء من حيث الإنتاجية وزمن التأخير هذا من جهة، ومن جهة أخرى فقد تم تحسين الخصائص العامة لطوبولوجيا Mesh بالأخص فيما يتعلق بقطر الشبكة والمسافة الوسطية، حيث تم تخفيض معدل القطر بنسبة 71,59% مقارنة مع الشبكة Mesh، وبنسبة 43,18% مقارنة مع بقية الشبكات الأخرى الداخلة بالدراسة.

الكلمات المفتاحية: الشبكات المدمجة على الشريحة، FC-Mesh، توصيل، طوبولوجيا، وصلة

* أستاذ مساعد ، قسم هندسة الحاسبات والتحكم الآلي، كلية الهندسة الميكانيكية والكهربائية، جامعة اللاذقية، اللاذقية، سورية.
** أستاذ ، قسم هندسة الحاسبات والتحكم الآلي، كلية الهندسة الميكانيكية والكهربائية، جامعة اللاذقية، اللاذقية، سورية.
*** مدرس، قسم هندسة الحاسبات والتحكم الآلي، كلية الهندسة الميكانيكية والكهربائية، جامعة اللاذقية، اللاذقية، سورية.
**** طالب دراسات عليا (دكتوراه) قسم هندسة الحاسبات والتحكم الآلي، كلية الهندسة الميكانيكية والكهربائية، جامعة اللاذقية، اللاذقية، سورية.

إيميل: adam.y.mahfoud@tishreen.edu.sy

Design of an Improved Mesh Topology with Integrated Connectivity and Study of its Properties

Dr.Balsam Eid*

Dr. Mohammed Hijazieh**

Dr. Yaarob Badr***

Adam Mahfoud****

(Received 30/12/2024 . Accepted 23/4/2025)

□ ABSTRACT □

Mesh is one of the most widely used and applied networks in the field of integrated networks on chip (NoC) as a type of square network and Torus network falls into the same context. Most academic and applied studies in this field have adopted modifications to the Mesh topology due to the unique features of this network, perhaps the most prominent of which are good homogeneity, ease of design, low diameter and high bandwidth, but the scalability problem is considered one of the most important problems that this topology suffers from, which results in an increase in delay time. Many studies have provided solutions to this problem, such as developing the router structure, modifying the routing algorithms or modifying the link structure of this network. This paper focuses on providing a solution to the problem of the Mesh network's suitability for scalability and the problems resulting from increasing the number of nodes by modifying the link and connection structure between the nodes in order to improve the performance and features of the Mesh network compared to XMesh, C²_Mesh, Torus and Mesh networks, which are all derived from the Mesh network itself. The proposed FC-Mesh structure achieved a significant improvement in performance in terms of throughput and delay time on the one hand, and on the other hand, the general characteristics of Mesh topology were improved, especially with regard to the network diameter and the average distance, as the diameter rate was reduced by 71.59% compared to the Mesh network, and by 43.18% compared to the rest of the other networks included in the study.

Key Words: Network-on-Chip, FC-Mesh, Connectivity, Topology, Link

* Assistant Professor, Department of Computers and automatic control Engineering, Faculty of mechanical and electrical engineering, Latakia University, Latakia, Syria.

** Professor, Department of Computers and automatic control Engineering, Faculty of mechanical and electrical engineering, Latakia University, Latakia, Syria.

*** Lecturer, Department of Computers and automatic control Engineering, Faculty of mechanical and electrical engineering, Latakia University, Latakia, Syria.

**** Postgraduate Student (Ph.D), Department of Computers and automatic control Engineering, Faculty of mechanical and electrical engineering, Latakia University, Latakia, Syria. Email: adam.y.mahfoud@tishreen.edu.sy

مقدمة:

تلعب طوبولوجيا الربط والتوصيل بين العقد في الشبكات المدمجة على الشريحة Network-on-Chip (NoC) دوراً أساسياً في تقييم الأداء للتطبيقات المخصصة التي تستخدم شبكات NoC، حيث تمثل الطوبولوجيا خريطة توزع العقد ضمن الشبكة وتدخل في تحديد إمكانية وسرعة الوصول إلى العقد، وبالتالي العامل الأول بالتأثير على أداء شبكات NoC. وتأتي أيضاً أهمية طوبولوجيا الربط من كونها تشكل المرحلة الأولى في تصميم أي شبكة ربط تليها مرحلة بناء خوارزمية التوجيه وضبط بارامترات التحكم بالازدحام والمرور ضمن الشبكة [1].

تتميز طوبولوجيا الربط بالعديد من البارامترات التي تدخل في التقييم عند تصميم الشبكة مثل درجة التعقيد والقطر والكلفة وعرض الحزمة وقابلية التوسيع [2]. يمكن تقسيم شبكات الربط الساكنة وفقاً لنموذج الاتصال إلى شبكات وحيدة البعد (1D) وشبكات ثنائية البعد (2D) وشبكات ثلاثية البعد (3D) أو تسمى بالشبكات المكعبية Hypercube (HC) [3]. تحتل شبكات Mesh و Torus والمكعبية الغالبية الأكبر من بنى وهيكلية الربط المستخدمة في شبكات NoC وأنظمة الاتصال الرقمية بمختلف تطبيقاتها نظراً للتجانس المناسب الذي تتمتع به هذه الشبكات من حيث توزع العقد وطريقة التوصيل فيما بينها. حيث تدخل في تصميم العديد من بنى الحوسبة النفرعية والتي تعتبر موجهة وملائمة للعمل على سيرفرات قواعد البيانات الضخمة ومخدمات الويب وأنظمة الاتصال الرقمية. معظم الدراسات على الشبكات المدمجة على الشريحة NoC اعتمدت ولا تزال على شبكات Mesh ثنائية البعد بسبب انتظامها وبساطتها وتعقيدها المنخفض، مثل شبكة الربط المطبقة في معالج TeraFlop من Intel حيث تضم 80 نواة موصولة بشبكة 2D-Mesh بحجم 8×10 [4]، و Intel MP Paragon XP/S، ومعالج Xeon من Intel والمصمم وفق طوبولوجيا Mesh [5]، كذلك فإن شبكة Mesh مطبقة في العديد من الأبحاث الأكاديمية ويتم استخدامها في تصميم شبكات الربط الهجينة Hybrid INs أو التعديل على بنيتها بهدف تحسين بارامتراتها.

الدراسات المرجعية:

اعتمدت العديد من الدراسات الحديثة بنية الشبكة Mesh وطوّرت عليها كالدراصة رقم [6] تم فيها تصميم وتحليل لخوارزمية توجيه وتطبيقها على طوبولوجيا 3D-Mesh حيث تبين أن الخوارزمية XYZ كانت الأفضل لدى مقارنتها مع خوارزميات التوجيه الأخرى يليها West First و North Last وضمن أنماط حركة مرور مختلفة. أيضاً الدراصة رقم [7] درست تطبيق البروتوكول MPLS على شبكة NoC وفق طوبولوجيا Mesh والذي حقق تحقّقاً أعلى بمقدار 5 مرات من تقنية wormhole من حيث دعم جودة الخدمة. تم اعتماد خوارزمية توجيه مطورة IWO [8] على شبكة Mesh ثنائية البعد حققت تحسين بكلفة الاتصال وتحسين بالإنتاجية وتقليل من استهلاك الطاقة وزمن التأخير.

قام الباحثون N. Prasad وآخرون [9] باقتراح طوبولوجيا قابلة للتطوير وفعالة للطاقة تدعم بنية NoC وذلك انطلاقاً من شبكة Mesh وبالاعتماد على مخطط De Bruijn الذي يقلل من متوسط تأخير نقل الباكييت ويدعم خاصية الاتصال السريع ويحسن معدل عدد الفجرات ضمن الشبكة وذلك بإضافة وصلات قطرية لشبكة Mesh. قام كل من Ya-gang WANG, Hui-min DU, Xu-bang SHEN [10] باقتراح

طوبولوجيا ربط جديدة تمّ تسميتها (Semi-Diagonal Torus) SD-Torus وقد تم تشكيل هذه الشبكة من دمج شبكة D-Torus مع وصلتين قطريتين إضافيتين من اتجاه الشمال الغربي للجنوب الشرقي لكل عقدة، وقد حسّنت هذه البنية معدل قابلية التوسع وتنوع المسار وتقليل التعقيد بالمقارنة مع شبكات Mesh-like و Mesh. الشبكة Dia-Torus [11] تم فيها استخدام وصلات إضافية تصل العقد بالزوايا الأربعة مع العقد المركزية للشبكة Torus. حيث أدت لزيادة طفيفة بالمساحة المخصصة للشبكة لكن الوصلات القطرية ساعدت في تقليل عدد القفزات hop count لحد كبير وأيضاً تخفيض بالقطر بالمقارنة مع البنية Torus. تم اقتراح البنيتين DMesh و DTorus [12] بغية تحسين الأداء وقابلية التوسع لكلا الشبكتين Mesh و Torus. البنية DMesh يمكن تصميمها بإضافة وصلات قطرية متصالبة للعقد ضمن الشبكة Mesh حيث أن كل العقد الداخلية يكون درجة تعقيدها 8، بينما بقية العقد الأخرى يكون تعقيدها من 3 إلى 5 وقد تميزت البنية المقترحة بأنها خفّضت قطر الشبكة Mesh بحيث أصبح $\sqrt{N} - 1$. قام كل من Lalit Kishore Arora و Rajkumar [13] بتعديل جديد C^2_Mesh على بنية الشبكة Mesh بإضافة أربع وصلات قطرية تصل المركز مع الزوايا الأربعة للشبكة Mesh بهدف تقليل قطر الشبكة Mesh بدون الزيادة الكبيرة في عدد الوصلات والتخفيف من التعقيد مقارنة بالبنى المذكورة أعلاه. وقد نتج عن البنية المقترحة تحسين في الأداء وتخفيض قطر الشبكة Mesh إلى $\sqrt{N} - 1$ وكان أدائها يشابه إلى حد كبير أداء الشبكة Torus. تعديل جديد على بنية الشبكة Mesh [14] تم من خلاله إضافة وصلات قطرية تصل جميع العقد التي تقع على القطرين الرئيسيين للشبكة Mesh وأيضاً تم إضافة وصلتين تصل العقد المتقابلة قطرياً. تم تسمية البنية المقترحة XMesh وتم تصميم خوارزمية توجيه خاصة بها XM. حققت الشبكة XMesh تخفيضاً جيداً بالمسافة الوسطية للشبكة Mesh.

كنتيجة لما سبق يتبين أن البنى المصممة السابقة حققت تفاوتاً بسيطاً في الأداء في كل مرة بين بارامتر وآخر وبالأخص من حيث طريقة التوصيل أو خوارزمية التوجيه أو حتى بنية الموجه، بيد أن البارامتر الأهم وهو القطر Diameter كان نفسه بالنسبة لكل من Torus, DMesh, XMesh, C^2_Mesh . وكما هو معلوم بأن قطر الشبكة هو المسؤول عن زيادة سرعة النقل وتقليل المسافة الوسطية بالتالي تخفيض زمن التأخير latency، من هنا نشأت مشكلة البحث بالحاجة إلى طوبولوجيا بديلة عن البنى المصممة بأبحاث سابقة تحقق أداءً أفضل وميزات مرغوبة بأقل كلفة مع الأخذ بالاعتبار تحقيق قابلية التوسع، حيث إن البنى المصممة بالدراسات المرجعية والمحسنة للشبكة Mesh عن طريق إضافة وصلات قطرية مثل Xmesh و C^2_Mesh ، عانت هذا الشبكات من زيادة كبيرة وغير متوازنة بالكلفة مقارنة مع تزايد حجم الشبكة مما يؤثر سلباً على موضوع قابلية التوسع scalability. أيضاً أدت طريقة التصميم المطبقة فيها بالنسبة للوصلات المضافة إلى توجيه للحمل وتركيزه على مناطق معينة من الشبكة بالتحديد مركز الشبكة والحواف الأربعة ما أدى إلى تقليل معدل الإنتاجية. انطلاقاً من هذه الفجوات البحثية في الدراسات المرجعية اقترحنا تصميم نموذج معدل عن طوبولوجيا Mesh يحقق ميزات الأداء المطلوبة ويلتزم بالزيادة الحاصلة بعدد العقد في الشبكات الحديثة.

أهمية البحث وأهدافه:

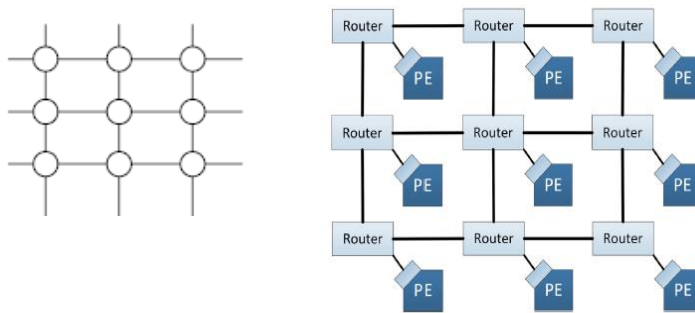
رغم بساطة الشبكة Mesh واستخدامها الشائع في العديد من التطبيقات والشرائح بيد أن قابلية التوسع (scalability) بالنسبة لهذه الشبكة تشكل حلقة مفرغة حيث أن زيادة حجم الشبكة يؤدي لضعف بارامترات الأداء بسبب قطر الشبكة الكبير والمسافة الوسطية العالية. ومن كون طوبولوجيا الربط بين العقد تعتبر عاملاً مؤثراً في موضوع زيادة حجم الشبكة وقابلية التوسع كان الهدف من البحث تصميم بنية ربط جديدة تدعم قابلية التوسع ولا تتأثر بزيادة حجم الشبكة وذلك من خلال التعديل على بنية الشبكة Mesh، الغاية من التصميم المعدل تحسين بارامترات الأداء للشبكة Mesh وذلك من خلال التحليل الرياضي وبالمقارنة مع هيكليات الربط المشابهة لها.

طرائق البحث ومواده:

1- شبكات المصفوفات ثنائية البعد 2D-Mesh:

شبكات المصفوفات ثنائية البعد mesh (2D) تم تصميمها على شكل شبكة بحجم $m \times n$ حيث أن m و n تمثلان عدد الأسطر و الأعمدة على التوالي ضمن شبكة Mesh. بالتالي يكون عدد العقد الكلي للشبكة (حجم الشبكة) $N=m*n$. يوضح الشكل (١) شبكة Mesh ثنائية البعد مربعة مكونة من 9 معالجات، كل العقد المركزية تتصل مع العقد الجيران بأربع وصلات بينما العقد الموجودة على الحواف تتصل بثلاث وصلات مع جيرانها أما العقد المتوضعة على الزوايا الأربعة فتتصل بوصلتين فقط مع العقد المجاورة بالتالي فإن درجة التعقيد للعقد مختلفة وذلك حسب موقع كل منها ضمن الشبكة وهو يساوي $4 \rightarrow 2$ (عادةً تؤخذ أكبر قيمة). يكون قطر الشبكة المربعة المكونة من N معالج $D = 2\sqrt{N} - 2$ ، بينما يكون قطر الشبكة التي يكون فيها $m \neq n$ (أبعادها $r \times N/r$) والمكونة من N معالج هو $D = r + \frac{N}{r} - 2$ ، لذا فالشبكات المربعة من هذا النوع تكون مرغوبة أكثر لأنها ذات قطر صغير مقارنة بالشبكات الحلقية [15][16]. عدد الوصلات في الشبكة Mesh يحسب بالنسبة لعدد المعالجات N بـ $2(N - \sqrt{N})$.

تتميز بنية الشبكة Mesh بالعديد من الميزات التي تسمح بتطبيقها بغالبية الشبكات المدمجة على الشريحة ومن أهمها عرض الحزمة العالي والتجانس الجيد والتصميم البسيط والتعقيد المنخفض وهذه ما سمح لها بشغل 60-70% من شرائح NoC المطبقة عملياً [17].



الشكل (١)- شبكة Mesh ثنائية البعد مربعة مكونة من 9 معالجات

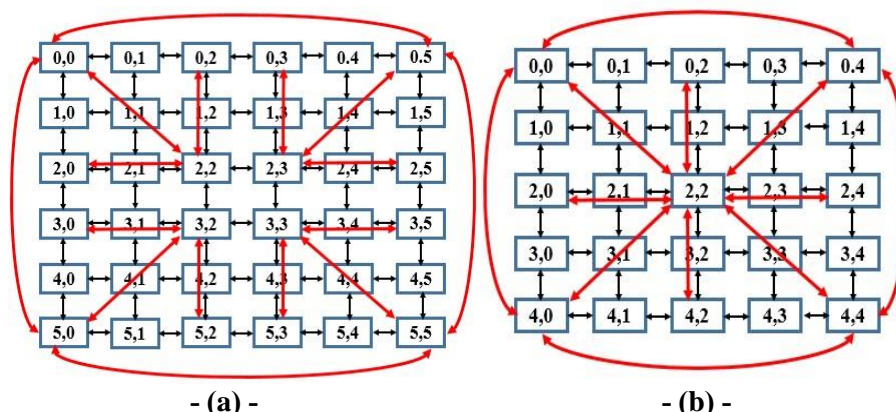
2- بنية التوصيل المقترحة:

الشبكة التي سنقوم بتصميمها هي شبكة معدلة عن الشبكة Mesh وهي ناتجة عن وصل مركز الشبكة Mesh مع العقد بالزوايا الأربعة والعقد على منتصف الحواف الأربعة وأربع وصلات إضافية تربط الزوايا الأربعة

مع بعضها للوصول إلى بنية ربط متكاملة للشبكة Mesh سيتم تسميتها الشبكة Full Connected Mesh (FC-Mesh). يمكن بناء الشبكة المعدلة المقترحة على الشبكة Mesh بإضافة الوصلات الآتية:

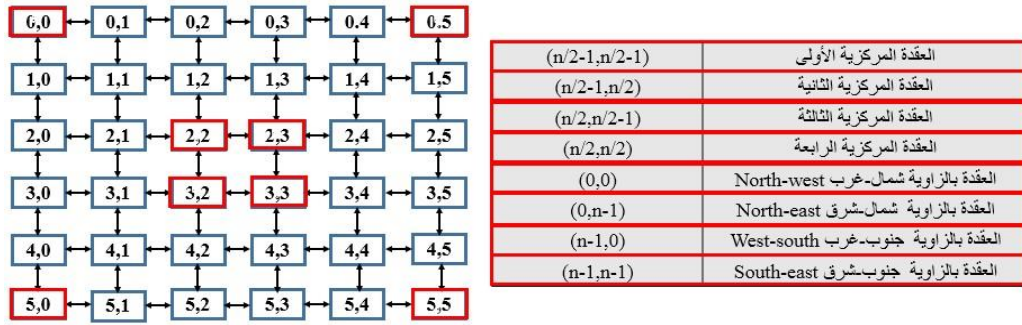
١. أربعة وصلات تربط العقد الأربعة في الزوايا مع العقد (ة) المركزية.
٢. أربعة (ثمانية) وصلات تربط العقد (ة) المركزية مع العقد المتوسطة بمنتصف حواف الشبكة بالنسبة للشبكة ذات عدد العقد الكلي الفردي (وثمانية وصلات بالنسبة للشبكة ذات عدد العقد الكلي الزوجي).
٣. أربعة وصلات تربط العقد بالزوايا الأربعة مع بعضها.

يبين الشكل (٢) بنية الشبكة FC-Mesh من أجل حجم شبكة مختلف (الشكل (٢-٢) يبين FC-Mesh بحجم شبكة زوجي (6×6) وعدد العقد الكلي (N=36) وعدد الوصلات المضافة باللون الأحمر 16 وصلة- الشكل (٢-٢) يبين شبكة FC-Mesh بحجم شبكة فردي (5×5) وعدد العقد الكلي (N=25) وعدد الوصلات المضافة باللون الأحمر 12 وصلة). يتم بناء شبكة FC-Mesh بحجم n×n حيث كل عقدة من العقد لها تموضع فيزيائي معين ضمن الشبكة وبإحداثيات سطر وعمود مميز حيث يبدأ ترقيم العقد بدءاً من العقدة (0,0) ثم (0,1) وهكذا حتى نهاية أول سطر تأخذ العقدة الرقم (0,n-1) وبنفس الترتيب لبقية الأسطر ضمن الشبكة Mesh حتى الانتهاء بالعقدة (n-1,n-1) بالعمود والسطر الأخيرين.



الشكل (٢): a - شبكة FC-Mesh بحجم شبكة زوجي (6×6) ، b - FC-Mesh بحجم شبكة فردي (5×5)

عدد العقد الكلي ضمن الشبكة FC-Mesh بحجم (n×n) هو N وهو جداء عدد الأسطر مع عدد الأعمدة (ضمن الدراسة المقترحة سيتم اعتماد الشبكة Mesh المربعة) . بالنسبة للشبكة FC-Mesh ذات الحجم الزوجي (عدد العقد الزوجي) فإن المركز هو عبارة عن أربعة عقد وتكون مواضع العقد المركزية والعقد بالزوايا الأربعة تأخذ موضعها كما هو مبين بالجدول المحتوى ضمن الشكل (3).



الشكل (3) - مواضع العقد بالمركز والزوايا الأربعة ضمن الشبكة FC-Mesh

الأمر نفسه بالنسبة للشبكة FC-Mesh ذات الحجم الفردي (عدد العقد الفردي) فإن المركز هو عبارة عن عقدة واحدة ويكون موقع هذه العقدة هو $(n-1/2, n-1/2)$ ، أما العقد بالزوايا الأربعة يكون موضعها نفس مواضع العقد بالزوايا الأربعة المحددة بالشكل (3).

3- التصميم الفيزيائي للشبكة FC-Mesh:

يمكن إنشاء الوصلات بين العقد في الشبكة المقترحة FC-Mesh حسب عدد العقد الكلي للشبكة زوجي أو فردي، وعليه يتم اتباع شروط محددة لإنشاء أي وصلة بين أي عقدتين ضمن الشبكة وفق الآتي:

بحالة شبكة FC-Mesh بعدد عقد زوجي وبحال كانت العقدتين $X(i, j)$ حيث $0 \leq i < n$ و $0 \leq j < n$ وعقدة ثانية $Y(s, t)$ حيث $0 \leq s < n$ و $0 \leq t < n$ عدد العقد ضمن السطر (أو العمود) عندها يكون هناك اتصال بين هاتين العقدتين إذا تحقق أحد الشروط المبينة بالجدول (1). أما بحالة شبكة FC-Mesh بعدد عقد كلي فردي فشرط الاتصال مبينة بالجدول (2).

الجدول (1) - شروط إنشاء وصلات بين أي زوجين مختلفين من العقد ضمن البنية FC-Mesh بحجم شبكة زوجي

$ s - i + t - j = 1$	الوصلات بين العقد الأفقية والعمودية المتجاورة وعددها $2n^2 - 2n$ وصلة
$i = 0$ و $j = 0$ و $s = \frac{n}{2} - 1$ و $t = \frac{n}{2} - 1$	الوصلات بين العقد المركزية الأربعة والعقد ضمن الزوايا الأربعة وعددها أربع وصلات
$i = 0$ و $j = n - 1$ و $s = \frac{n}{2} - 1$ و $t = \frac{n}{2}$	
$i = n - 1$ و $j = 0$ و $s = \frac{n}{2}$ و $t = \frac{n}{2} - 1$	
$i = n - 1$ و $j = n - 1$ و $s = \frac{n}{2}$ و $t = \frac{n}{2}$	الوصلات بين العقد المركزية الأربعة والعقد المقابلة لها بمنصف الحواف وعددها ثمان وصلات
$i = 0$ و $s = \frac{n}{2} - 1$ و $(j = t = s$ أو $j = t = s + 1)$	
$i = n - 1$ و $s = \frac{n}{2}$ و $(j = t = s$ أو $j = t = s - 1)$	
$j = 0$ و $t = \frac{n}{2} - 1$ و $(i = s = t$ أو $i = s = t + 1)$	
$j = n - 1$ و $t = \frac{n}{2}$ و $(i = s = t$ أو $i = s = t - 1)$	الوصلات التي تصل العقد ضمن الزوايا الأربعة مع بعضها وعددها أربع وصلات
$i = j = t = 0$ و $s = n - 1$	
$i = j = s = 0$ و $t = n - 1$	
$i = 0$ و $s = t = j = n - 1$	
$i = s = t = n - 1$ و $j = 0$	

الجدول (2) - شروط إنشاء وصلات بين أي زوجين مختلفين من العقد ضمن البنية FC-Mesh بحجم شبكة فردي

$ s - i + t - j = 1$	الوصلات بين العقد الأفقية والعمودية المتجاورة وعددها $2n^2 - 2n$ وصلة
$i = 0$ و $j = 0$ و $s = \frac{n-1}{2}$ و $t = \frac{n-1}{2}$	الوصلات بين العقدة المركزية والعقد ضمن الزوايا الأربعة وعددها أربع وصلات
$i = 0$ و $j = n-1$ و $s = \frac{n-1}{2}$ و $t = \frac{n}{2}$	
$i = n-1$ و $j = 0$ و $s = \frac{n}{2}$ و $t = \frac{n-1}{2}$	
$i = n-1$ و $j = n-1$ و $s = \frac{n}{2}$ و $t = \frac{n}{2}$	
$i = 0$ و $s = t = j = \frac{n-1}{2}$	الوصلات بين العقدة المركزية والعقد المقابلة لها بمنتصف الحواف وعددها أربع وصلات
$i = n-1$ و $s = t = j = \frac{n-1}{2}$	
$i = s = t = \frac{n-1}{2}$ و $j = 0$	
$i = s = t = \frac{n-1}{2}$ و $j = n-1$	
$i = j = t = 0$ و $s = n-1$	الوصلات التي تصل العقد ضمن الزوايا الأربعة مع بعضها وعددها أربع وصلات
$i = j = s = 0$ و $t = n-1$	
$i = 0$ و $s = t = j = n-1$	
$i = s = t = n-1$ و $j = 0$	

4- ميزات الشبكة FC-Mesh:

سنقوم ضمن هذا القسم بدراسة ميزات الشبكة FC-Mesh ومقارنتها مع أربعة شبكات أخرى وهي: الشبكتين الأساسيتين Mesh و Torus، حيث تعتبر الشبكة Torus بنية معدلة عن الشبكة Mesh مع إضافة وصلات رأسية وأفقية تصل الصف العلوي مع الصف السفلي من الشبكة وأيضاً العمود الأخير مع العمود الأول منها، أيضاً سنقوم بتضمين شبكة C^2_Mesh والشبكة XMesh ضمن دراستنا كون كل من هاتين الشبكتين تضيف وصلات قطرية مائلة تصل مركز الشبكة مع العقد بالزوايا الأربعة. الشبكة C^2_Mesh تضيف أربعة وصلات ثابتة تصل زوايا الشبكة الأربعة مع مركزها، بينما الطوبولوجيا XMesh تستخدم وصلات إضافية متغيرة مع تغير حجم الشبكة اثنان من هذه الوصلات لوصل كل زاويتين متقابلتين قطرياً مع بعضهما، وباقي الوصلات الأخرى المضافة تصل كل عقدتين على القطر الرئيسي والثانوي للشبكة بشكل قطري. ستتم دراسة ميزات وخصائص الشبكات المذكورة أعلاه باستخدام برنامج Matlab 2021 وذلك من أجل حالتين لحجم الشبكة المعدلة FC-Mesh (N زوجي وفردى) بحيث يتغير عدد العقد الكلي (حجم الشبكة) بالتناوب $N=\{25,36,81,100,225,1024,2025,4096\}$.

١-٤ درجة التعقيد (Degree):

يختلف حساب درجة التعقيد في الشبكة FC-Mesh تبعاً لعدد العقد الكلي زوجي أو فردي. ففي حالة العدد الكلي للعقد N (حجم الشبكة) زوجي فإن درجة التعقيد هي 7 بالنسبة للعقد المركزية الأربعة و 5 بالنسبة للعقد بالزوايا الأربعة و 4 للعقد الداخلية وفي منتصفات الحواف بينما تكون 3 لبقية العقد بالتالي تكون درجة التعقيد $deg=\{7,5,4,3\}$. في حالة العدد الكلي للعقد N (حجم الشبكة) فردي فإن درجة التعقيد هي 12 بالنسبة للعقدة المركزية و 5 بالنسبة للعقد بالزوايا الأربعة و 4 للعقد الداخلية وفي منتصفات الحواف بينما تكون 3 لبقية العقد بالتالي تكون درجة التعقيد $deg=\{12,5,4,3\}$. يبين الجدول (3) و (4) درجة تعقيد العقد ضمن الشبكة FC-Mesh بحسب التوضع المكاني للعقد من أجل حجم شبكة فردي وزوجي على التوالي.

الجدول (٣) - درجة تعقيد العقد ضمن الشبكة FC-Mesh من أجل حجم الشبكة N فردي

درجة التعقيد	موقع العقدة
7	$(\frac{n}{2} - 1, \frac{n}{2} - 1), (\frac{n}{2} - 1, \frac{n}{2}), (\frac{n}{2}, \frac{n}{2} - 1), (\frac{n}{2}, \frac{n}{2})$
5	$(0,0), (0, n-1), (n-1,0), (n-1, n-1)$
3	$(0, \{for i = 1, i \leq \frac{n}{2} - 2, i++\}), (0, \{for i = \frac{n}{2} + 1, i \leq n - 2, i++\}),$ $(\{for i = 1, i \leq \frac{n}{2} - 2, i++\}.0), (\{for i = \frac{n}{2} + 1, i \leq n - 2, i++\}.0),$ $(\{for i = 1, i \leq \frac{n}{2} - 2, i++\}.n - 1), (\{for i = \frac{n}{2} + 1, i \leq n - 2, i++\}.n - 1),$ $(n - 1, \{for i = 1, i \leq \frac{n}{2} - 2, i++\}), (n - 1, \{for i = \frac{n}{2} + 1, i \leq n - 2, i++\})$
4	بقية العقد

الجدول (٤) - درجة تعقيد العقد ضمن الشبكة FC-Mesh من أجل حجم الشبكة N زوجي

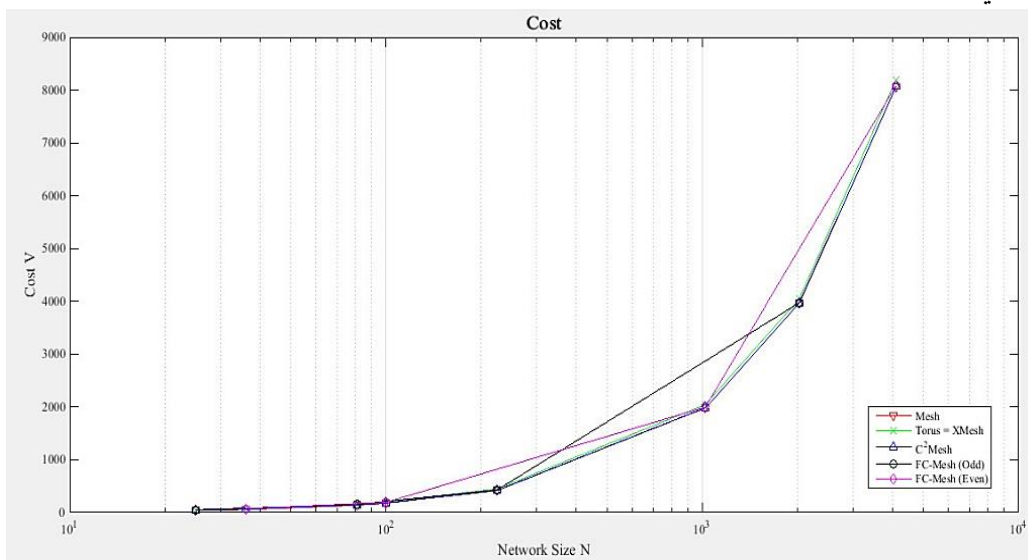
2-4 عدد الوصلات (الكلفة) Cost:

تمثل الكلفة عدد الوصلات الكلية الموجودة بالشبكة ويفضل أن تكون كلفة الشبكة أصغر ما يمكن، إن عدد الوصلات الكلي للشبكة FC-Mesh هو نفسه عدد وصلات الشبكة Mesh مضافاً لها 16 وصلة أي $2(N - \sqrt{N}) + 16$ وصلة بحال كان عدد العقد الكلي (حجم الشبكة) هو عدد زوجي، بينما بحال عدد العقد الكلي هو عدد فردي عندها يكون عدد الوصلات الكلي $2(N - \sqrt{N}) + 12$ ، يبين الشكل (٤) عدد الوصلات

درجة التعقيد	موقع العقدة
12	$(\frac{n-1}{2}, \frac{n-1}{2})$
5	$(0,0), (0, n-1), (n-1,0), (n-1, n-1)$
3	$(0, \{for i = 1, i \leq \frac{n-1}{2} - 1, i++\}), (0, \{for i = \frac{n-1}{2} + 1, i \leq n - 2, i++\})$ $, (\{for i = 1, i \leq \frac{n-1}{2} - 1, i++\}.0), (\{for i = \frac{n-1}{2} + 1, i \leq n - 2, i++\}.0),$ $(\{for i = 1, i \leq \frac{n-1}{2} - 1, i++\}.n - 1), (\{for i = \frac{n-1}{2} + 1, i \leq n - 2, i++\}.n - 1)$ $, (n - 1, \{for i = 1, i \leq \frac{n-1}{2} - 1, i++\}), (n - 1, \{for i = \frac{n-1}{2} + 1, i \leq n - 2, i++\})$
4	بقية العقد

الكلي للشبكة FC-Mesh والشبكات XMesh, C²_Mesh, Torus, Mesh تبعاً لعدد العقد N. حيث يتبين من الشكل (٤) نفسه أن كلفة الشبكتين XMesh و Torus هما الأكبر تليها كلفة الشبكة المقترحة حيث تكون

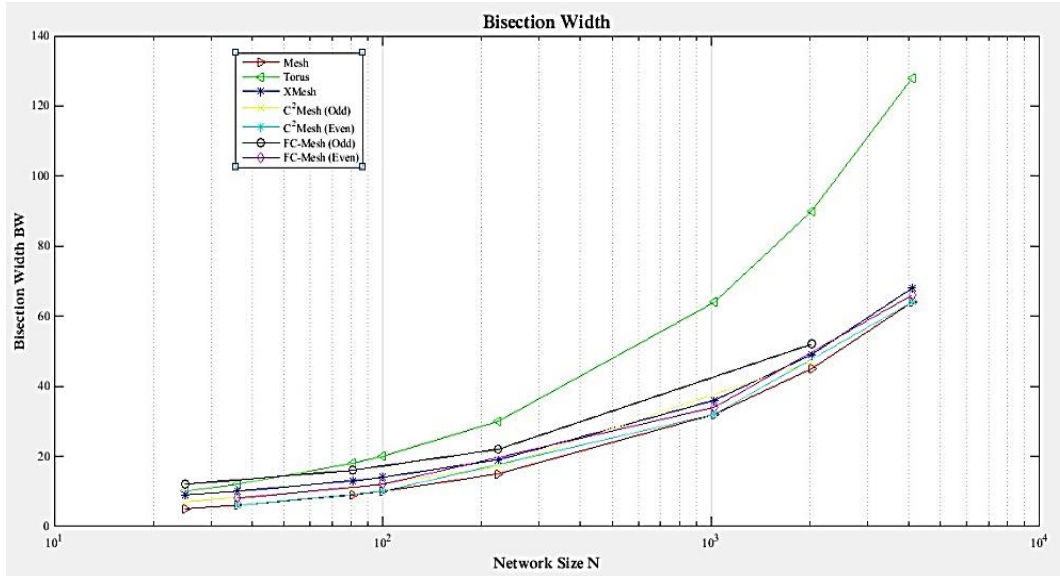
مقارنة من كلفة الشبكة C^2_Mesh بمقدار بسيط (8 دوماً). السبب بذلك يعود لكون عدد الوصلات المضافة يتغير مع زيادة عدد العقد الكلي في كل من شبكتي XMesh و Torus بينما يكون هناك ثبات في كلفة التوصيلات الإضافية بالنسبة للشبكة المقترحة وشبكة C^2_Mesh مهما زاد عدد العقد الكلي للشبكة، بالتالي سيكون هناك فرق واضح وكبير بالكلفة من أجل الأحجام الكبيرة للشبكة بالنسبة لشبكتي XMesh و Torus مقارنة بشبكتي C^2_Mesh و FC-Mesh.



الشكل (٤) - كلفة الشبكة FC-Mesh والشبكات Mesh, Torus, C^2_Mesh , XMesh تبعاً لعدد العقد N

3-4 عرض حزمة التنصيف (BW) Bisection Width:

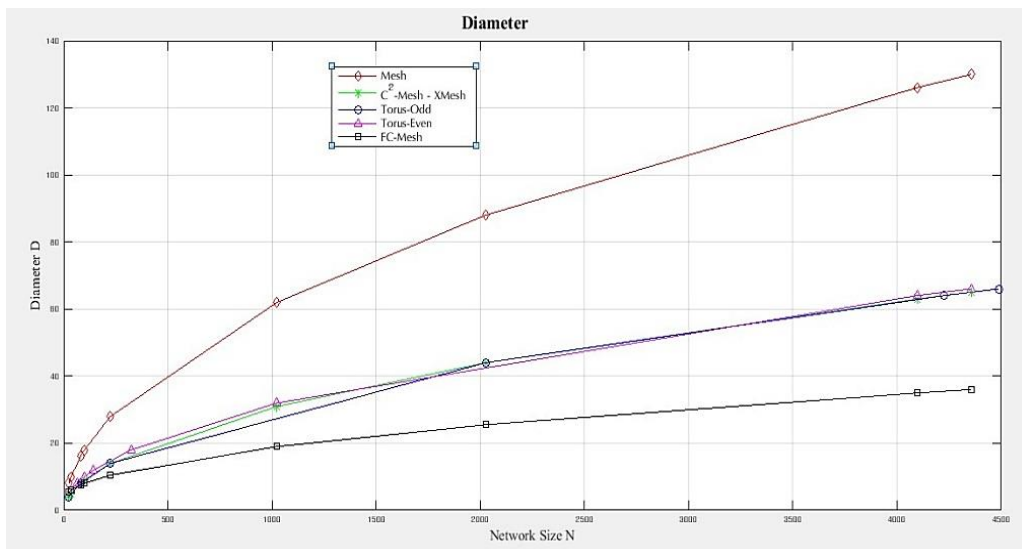
يمثل عرض حزمة التنصيف أصغر عدد من الوصلات التي يجب قطعها كي تقسم الشبكة إلى شبكتين جزئيتين لكل منها نصف حجم الشبكة الأصلية، ويفضل أن يكون عرض حزمة التنصيف للشبكة أكبر ما يمكن. إن عرض حزمة التنصيف للشبكة المقترحة بحجم شبكة زوجي هو $2\sqrt{N} + 2$ ، بينما يكون أكبر بحالة حجم الشبكة فردي $2\sqrt{N} + 7$ بينما عرض الحزمة لباقي الشبكات الأخرى الداخلة بالدراسة يأخذ القيم $2\sqrt{N} + 4$ ، $2\sqrt{N}$ ، $2\sqrt{N} + 2$ ، $2\sqrt{N}$ ، $2\sqrt{N}$ للشبكات XMesh، C^2_Mesh (Even)، C^2_Mesh (Odd)، Torus، Mesh بالترتيب، وذلك كما هو مبين بالشكل (٥). يتبين من الشكل إن عرض حزمة التنصيف للشبكة Torus يأخذ أعلى قيمة يليه عرض حزمة التنصيف للشبكة المقترحة ثم XMesh يليه عرض حزمة التنصيف للشبكة C^2_Mesh ثم الشبكة Mesh.



الشكل (٥) - عرض حزمة التنصيف للشبكة FC-Mesh والشبكات Mesh, Torus, C^2_Mesh , XMesh تبعاً لعدد العقد N

4-4 قطر الشبكة (D):Diameter

يمثل قطر الشبكة طول الطريق الأطول بين الأزواج المختلفة من العقد، والشبكة ذات القطر الصغير تكون ذات سرعة أكبر في نقل الرسائل. تميّزت البنية المعدلة بأنها حسنت من قطر الشبكة والمسافة الوسطية بين عقدتين مقارنة مع البنية Mesh بمقدار كبير وأيضاً مقارنةً مع الشبكتين XMesh و C^2_Mesh حيث أن قطر الشبكة المقترحة من أجل عدد عقد كلي N هو $D = \frac{n}{2} + 3$ ($n = \sqrt{N}$) وذلك من أجل قيم $n \geq 6$ ، أما من أجل $n = \{4, 5\}$ يكون $D = n - 1$. بالتالي كما يتضح من الشكل (٦) فإن قطر الشبكة المقترحة هو الأفضل يليه قطر الشبكات XMesh، C^2_Mesh ، Torus (Odd)، هو $\sqrt{N} - 1$ يليه قطر الشبكة $\sqrt{N} = \text{Torus (Even)}$ بينما قطر الشبكة Mesh كان الأكبر $2(\sqrt{N} - 1)$.



الشكل (٦) - قطر الشبكة FC-Mesh والشبكات Mesh, Torus, C^2_Mesh , XMesh تبعاً لعدد العقد N

4-5 المسافة الوسطية (Average Distance):

تدخل المسافة الوسطية في حساب عامل نقل البيانات عبر الشبكة والتي تحدد عدد الوصلات التي تمر الرسالة عبرها عند النقل بين أي عقدتين ضمن الشبكة، وهي تدخل في تحديد الكلفة cost ومعدل تأخير رتل الانتظار. عموماً كلما زاد عدد الروابط لكل عقدة تتناقص المسافة الوسطية وأيضاً عرض الحزمة Bandwidth يتناقص [18].

لحساب المسافة الوسطية Average Distance لأي شبكة NoC يجب بدايةً تصنيف عقد الشبكة جميعها ضمن أصناف تبعاً لدرجة تعقيدها فمن أجل شبكة بحجم $N=25$ يكون هناك ستة أصناف من العقد مقسمة تبعاً لموقع العقدة من الشبكة ودرجة تعقيدها وهي كالآتي:

الصنف الأول Class1 بالنسبة للعقد بالزوايا الأربعة $C1=\{0,4,20,24\}$

الصنف الثاني Class2 للعقد بمنتصفات الحواف الأربعة وعددها أربعة $C2=\{2,10,14,22\}$

الصنف الثالث Class3 للعقد بالحواف عدداً الصنفين 1 و 2 وعددها $4\sqrt{N}-12=8$

$C3=\{1,3,5,9,15,19,21,23\}$

الصنف الرابع Class4 بالنسبة للعقد الداخلية $C4=\{6,8,16,18\}$

الصنف الخامس Class5 بالنسبة للعقد الداخلية $C5=\{7,11,13,17\}$

الصنف السادس Class6 بالنسبة للعقد المركزية وعددها 1 $C6=\{12\}$

بالتالي يكون هناك ستة أصناف للشبكة FC-Mesh، لو تم حساب المسافة بين كل عقدة من كل صنف بالنسبة لبقية عقد الشبكة عندها يمكن تنظيم الجدول (5) الذي يمثل كل سطر فيه عدد القفزات hop count بين العقدة المدروسة في العمود المقابل مع بقية العقد. من الجدول (5) يمكن حساب المسافة الوسطية للشبكة FC-Mesh من خلال حساب عدد القفزات الكلي المطلوب للانتقال بين كل العقد للشبكة بالنسبة لمربع حجم الشبكة N^2 .

$$\left. \begin{array}{l} D(1)=1*5+2*14+3*5=48 \\ D(2)=1*4+2*12+3*8=52 \\ D(3)=1*3+2*7+3*11+4*3=62 \\ D(4)=1*4+2*6+3*11+4*3=61 \\ D(5)=1*4+2*14+3*6=50 \\ D(6)=1*12+2*12=36 \end{array} \right\} \quad (1)$$

$$\begin{aligned} D_{FC-Mesh} &= \frac{[D(1) * 4 + D(2) * 4 + D(3) * 8 + D(4) * 4 + D(5) * 4 + D(6) * 1]}{N^2} \\ &= \frac{[48 * 4 + 52 * 4 + 62 * 8 + 61 * 4 + 50 * 4 + 36 * 1]}{25^2} \\ &= \frac{[192 + 208 + 496 + 244 + 200 + 36]}{625} = \frac{1376}{625} = 2.2 \end{aligned}$$

وبنفس الطريقة التي قمنا باستنتاج المسافة الوسطية للشبكة FC-Mesh، قمنا باستنتاج المسافة الوسطية للشبكات XMesh، C²_Mesh، Torus و Mesh وقد كانت القيم الناتجة على التوالي 2,55 ، 2,32 ، 3,28. بالتالي نجد أنّ البنية المقترحة FC-Mesh تملك أقل مسافة وسطية مقارنةً مع البنى الداخلة بالمقارنة، وهذا ما يجعلها أسرع في تبادل البيانات ونقل الرسائل.

الجدول (5) - المسافة الوسطية للشبكة FC-Mesh من أجل N=25

D \ C	0 ∈ (1)	2 ∈ (2)	1 ∈ (3)	6 ∈ (4)	7 ∈ (5)	12 ∈ (6)
1	1,4,5,12,20	1,3,7,12	0,2,6	1,5,7,11	2,6,8,12	0,2,4,7,10,11,13,14,17,20,22,24
2	2,3,6,7,9,10,11,13,14,15,17,21,22,24	0,4,6,8,10,11,13,14,17,20,22,24	3,4,5,7,11,12,20	0,2,8,10,12,16	0,1,3,4,5,9,10,11,13,14,17,2,0,22,24	1,3,5,6,8,9,15,16,18,19,21,23
3	8,16,18,19,23	5,9,15,16,18,19,21,23	8,9,10,13,14,15,16,17,21,22,24	3,4,9,13,14,15,17,20,21,22,24	15,16,18,19,21,23	---
4	---	---	18,19,23	18,19,23	---	---
Total=	24	24	24	24	24	24

6-4 زمن التأخير (Latency):

زمن التأخير هو جزء من التأخير الفعلي للشبكة أو الزمن اللازم لنقل الحزمة أو البايت من العقدة A إلى العقدة B في شبكة فارغة. ويعرف معدل التأخير الزمني Ideal Average Latency (T) بأنه مقدار التأخير الزمني بين كل العقد في حال عدم وجود ازدحام بالشبكة in the absence of congestion ويحسب رياضياً بالمعادلة رقم (٢):

$$T = H * T_r + \frac{D}{v} + \frac{L}{b} \quad (٢)$$

H يمثل عدد القفزات hop count من العقدة المصدر إلى العقدة الهدف

T_r التأخير في التوجيه ضمن الموجه وواحدته cycle/hop

D المسافة الوسطية بين عقدي المصدر والهدف وتساوي عادةً H وتقاس بعدد القفزات hops

v هي سرعة النقل ضمن الوصلات وواحدتها flit/cycle

L هو طول البايت Packet length وواحدته flit

b عرض القناة (عرض القناة) وواحدته flit/cycle

عموماً يكون الاختلاف بقيم D و H باختلاف الطوبولوجيا وطريقة التوصيل بين العقد بينما T_r تُحدد قيمته تبعاً لخوارزمية التوجيه المطبقة والتصميم الفيزيائي للموجه (البنية الداخلية). بحال كان تصميم الموجه بالشكل النموذجي الذي يتضمن خمسة مراحل 5-stage pipeline وكان زمن التأخير بين المراحل هو 1 cycle عندها يكون زمن المعالجة للموجه هو 4 cycle وهو يمثل قيمة T_r معدل التأخير في التوجيه ضمن الموجه 4 cycle/hop، ولو تم افتراض سرعة النقل v=1 flit/cycle، وطول البايت L=2، وعرض القناة b=1 flit/cycle عندها يكون معدل زمن التأخير للشبكات FC-Mesh والشبكات الداخلة بالدراسة XMESH،

Mesh و Torus ، C^2_Mesh هي على التوالي 13 ، 14,15 ، 14,75 ، 13,6 و 18,4. بالتالي يتبين أن الشبكة المقترحة تمتلك زمن تأخير أقل مقارنةً مع الشبكات الأخرى الداخلة بالمقارنة.

٤-7 الإنتاجية (Throughput):

تعتبر الإنتاجية مقياساً مناسباً للشبكات المدمجة على الشريحة NoC. تعرف إنتاجية الشبكة على أنها إجمالي عدد الرسائل التي يتم إرسالها بنجاح واستقبالها عبر الشبكة لكل وحدة زمنية، وهي تمثل معدل النقل عبر الشبكة. تُحسب إنتاجية الشبكة وفق العلاقة الرياضية رقم (٣):

$$TH \leq 2b * Bc / N \quad (3)$$

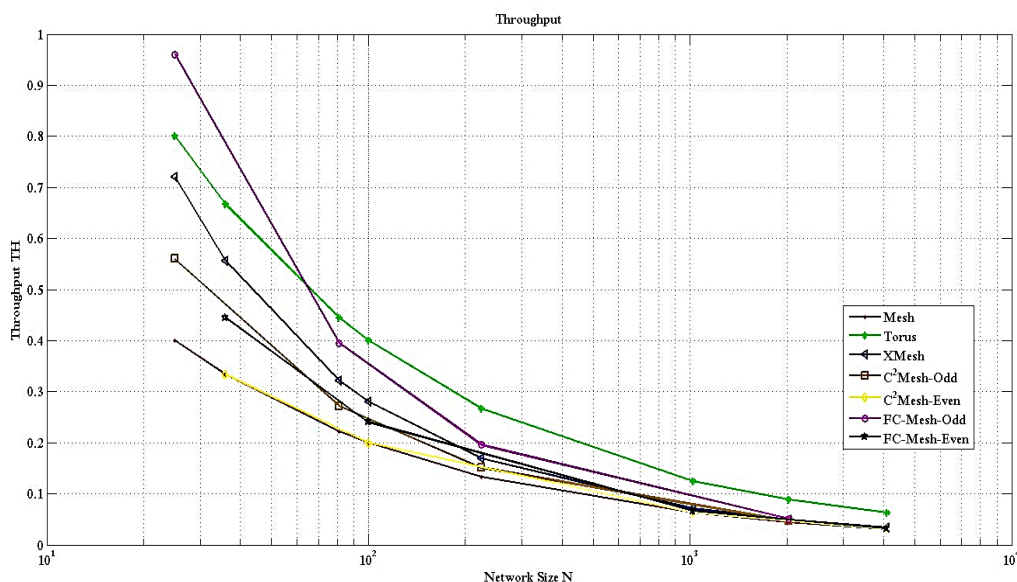
▪ TH الإنتاجية وواحدتها bits/ nanosecond

▪ b عرض القناة واحدته flit/cycle

▪ Bc ويمثل عرض حزمة التنصيف

▪ N يمثل حجم الشبكة (عدد العقد الكلي)

يبين الشكل (٧) إنتاجية الشبكة FC-Mesh والشبكات Mesh ، Torus ، C^2_Mesh ، XMesh تبعاً لعدد العقد N. حيث يتبين من الشكل نفسه أن إنتاجية الشبكة المقترحة FC-Mesh هي الأعلى تليها إنتاجية الطوبولوجيا Torus تليها XMesh، بينما كانت شبكات Mesh و C^2_Mesh هما الأقل إنتاجية ويفسر ذلك بقلة عدد الوصلات الطويلة التي تصل بين العقد البعيدة والتي تقع على حواف الطوبولوجيا، حيث إن هذه الوصلات تساهم في تقليل المسافة الوسطية للانتقال بين العقد البعيدة عن بعضها بالأخص المتقابلة قطرياً والتي تقع على حافتين متقابلتين، وهذا يزيد من سرعة النقل عبر الشبكة وبالتالي يساهم في تحسين قيم الإنتاجية. إن إنتاجية الشبكة تتناسب طردياً مع عرض حزمة التنصيف، فعلى سبيل المثال من أجل عدد عقد كلي $N=225$ كانت إنتاجية الشبكات الخمسة FC-Mesh ، XMesh ، C^2_Mesh ، Torus ، Mesh هي { 0.13 ، 0.17 ، 0.15 ، 0.17 ، 0.19 } على الترتيب.



الشكل (٧) - إنتاجية الشبكة FC-Mesh والشبكات Mesh ، Torus ، C^2_Mesh ، XMesh تبعاً لعدد العقد N

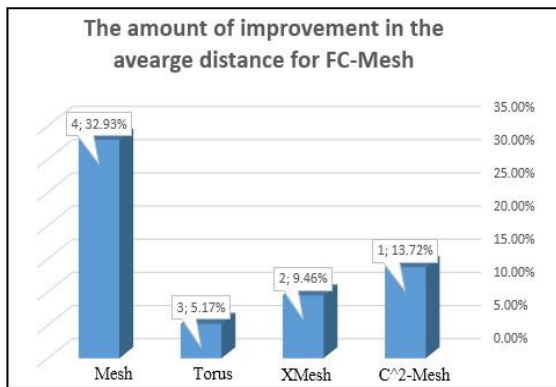
4-8 تنوع المسار (Path Diversity):

هي ميزة تتيح إمكانية النقل عبر أكثر من مسار ضمن الشبكة في حال وجود عدة مسارات قصيرة بين الأزواج المختلفة للشبكة نفسها ويطبق عند وجود عدة مسارات قصيرة بين العقد ضمن الشبكة أو بحال وجود أكثر من مسار قصير بين زوجين مختلفين من العقد. تتوع المسار في شبكة الربط يعطي نتائج إيجابية أكبر من حيث التسامح مع الخطأ وسهولة تطبيق خوارزميات التوجيه [19]. على فرض $SP[i][j]$ مصفوفة تشير إلى عدد المسارات القصيرة بين أي عقدتين عندها يمكن حساب تنوع المسار من أجل شبكة FC-Mesh بحجم $n \times n$ من خلال حساب عدد المسارات القصيرة التي تصل بين العقد بالنسبة لكل عقدة من عقد الشبكة وقسمتها على عدد العقد الكلي للشبكة وفقاً لخوارزمية الجار الأقرب. من أجل $N=25$ يمكن حساب تنوع المسار للشبكة FC-Mesh وفق خوارزمية الجار الأقرب الموضحة بالجدول (6).

وعليه تكون القيمة المميزة لتنوع المسار للشبكة FC-Mesh:

$$\text{path diversity}_{FC-Mesh} = \frac{\text{The number of transfers}}{N} = \frac{42}{25} = 1.68$$

وبنفس الطريقة ومن أجل $N=25$ بحال تطبيق خوارزمية الجار الأقرب على الشبكات

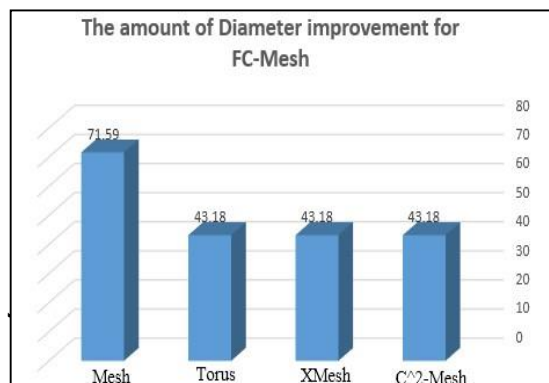


C^2_Mesh ، XMesh تكون القيمة المميزة لتنوع المسار على الترتيب 1.44، 1.24. بالتالي يمكن القول بأن البنية المقترحة حسنت معدل تنوع المسار بمقدار 16.67%، 35.48% مقارنةً مع C^2_Mesh ، XMesh على التوالي. يبين الشكل (٨) معدلات التحسين لبارامترات الشبكة FC-Mesh مقارنةً مع الشبكات الأخرى الداخلة بالدراسة.

الجدول (6) - تطبيق خوارزمية الجار الأقرب على الشبكة FC-

Mesh من أجل $N=25$

start with node {0}	SP[0][1]=1 , SP[0][4]=1 , SP[0][5]=1 , SP[0][12]=1 , SP[0][20]=1
{1,4,5,12,20}	SP[0][2]=2 , SP[0][3]=1 , SP[0][6]=2 , SP[0][7]=1 , SP[0][9]=1 , SP[0][10]=2 , SP[0][11]=1 , SP[0][13]=1 , SP[0][14]=1 , SP[0][15]=1 , SP[0][17]=1 , SP[0][21]=1 , SP[0][22]=1 , SP[0][24]=3
{2,3,6,7,9,10,11,13,14,15,17,21,22,24}	SP[0][8]=4 , SP[0][16]=4 , SP[0][18]=2 , SP[0][19]=4 , SP[0][23]=4
{8,16,18,19,23}	finish



- (B) -

- (A) -

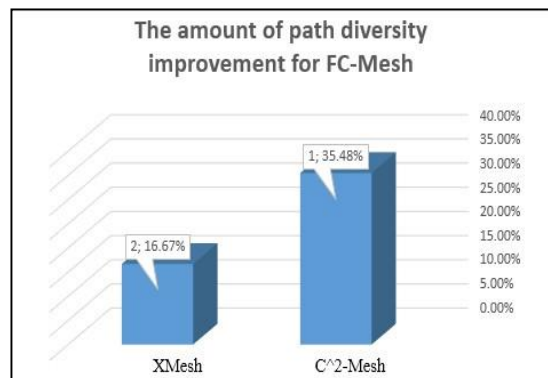
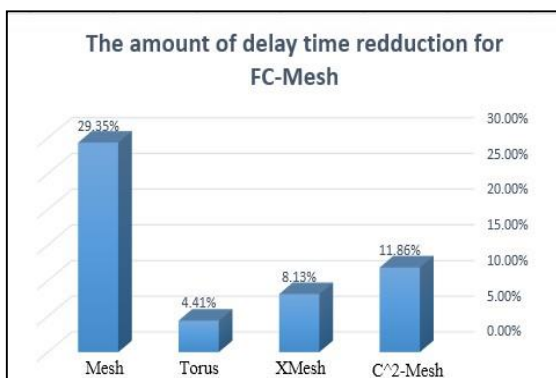
- (D) -

- (C) -

الشكل (٨) - معدلات تحسين بارامترات الشبكة FC-Mesh والشبكات Mesh, Torus, Mesh, C²_Mesh, XMesh تبعاً لعدد العقد N (A): القطر - (B): المسافة الوسطية - (C): تنوع المسار - (D): زمن التأخير

5- الاستنتاجات والتوصيات:

رغم بساطة الشبكة Mesh واستخدامها الشائع في العديد من التطبيقات والشرائح بيد أن هذه البنية تعاني من مشاكل عديدة أهمها زمن التأخير الكبير وصعوبة قابلية التوسيع مع زيادة حجم الشبكة، كما أن التصاميم الأخرى لهذه الشبكة لم تحسن كثيراً في الأداء لا سيما فيما يتعلق بالقطر. قدّم البحث بنية جديدة معدلة عن الشبكة Mesh وهي FC-Mesh والتي حققت تحسناً كبيراً بقطر الشبكة لم تحقّقه البنى السابقة المدروسة ضمن البحث والذي كان مساوياً نصف القطر تقريباً من قطر الشبكات المشابهة، فقد تم تخفيض معدل القطر بنسبة 71,59% مقارنة مع الشبكة Mesh، وبنسبة 43,18% مقارنة مع بقية الشبكات الأخرى الداخلة بالدراسة، هذا من جهة ومن جهة أخرى فقد كان الأداء من حيث تنوع المسار والمسافة الوسطية أفضل من الشبكات الأخرى الداخلة بالدراسة، فمن حيث المسافة الوسطية كانت الشبكة المقترحة أفضل بمقدار 32.93% مقارنة بالشبكة Mesh، وبمقدار 13.72% مقارنة بالشبكة C²_Mesh، وبمعدل 9.46% مقارنة بالشبكة XMesh، أما بالنسبة للشبكة Torus فقد كانت المسافة الوسطية للشبكة المقترحة أفضل بمعدل 5.17% من



حيث زمن التأخير كان زمن تأخير الشبكة المقترحة

FC-Mesh أفضل من أزمنة تأخير الشبكات Mesh, Torus, Mesh, C²_Mesh, XMesh بمقدار 29.35%, 4.41%, 8.13%, 11.86% على الترتيب. من النتائج السابقة نجد أن الطوبولوجيا FC-Mesh يمكن أن تكون نموذجاً مناسباً للتصميم العملي لشبكات NoC بالأخص أن عدد الوصلات المضافة لا يتأثر بقابلية التوسيع بالنسبة لحجم الشبكة، كما أنّ طول الوصلات المضافة المستخدمة بالشبكة هو نفسه أو أقل من

طول الوصلات المضافة بالشبكات المحسنة للشبكة Mesh المصممة بالدراسات المرجعية. يوصي البحث بإمكانية تطبيق الطوبولوجيا المقترحة في بناء وتصميم بنى ثلاثية الأبعاد للشبكة Mesh أو حتى بالإمكان تطبيق نفس البنية المقترحة ثنائية البعد على شبكات NoC الضوئية أو اللاسلكية، حيث تختلف التقنية مع بقاء فكرة وطريقة التصميم نفسها.

المراجع:

- [1]. Boudellioua, A; Alzeidi, N. 2018, "**PentaNoc: A New Scalable and self-similar NoC Architecture**", Procedia Computer Science 134, 358–364.
- [2]. CHEN, J. May 2012, "**Performance evaluation of network-on-chip architecture**", Master of Engineering, Faculty of Engineering and Applied Science Memorial University of Newfoundland.
- [3]. El-Rewini, H; Abd-El-Barr, M. 2005, "**Advanced Computer Architecture and Parallel Processing**". Wiley Series on parallel and distributing series editor: Albert Y. Zomaya, Published by John Wiley & Sons, Inc., Hoboken, New Jersey, Canada, 287P.
- [4]. Balkan, A, O. 2008, "**Mesh-of-Trees interconnection network for an explicitly multi-threaded parallel computer architecture**". Doctoral of Philosophy, University of Maryland.
- [5]. 23 Jan, 2023. < <https://www.top500.org/>>.
- [6]. Syal, N; Sehgal, V. September 2020, "**Qualitative Analysis of 3D Routing Algorithms in 3×3×3 Mesh NoC Topology Under Varying Load in Bio-SoC**", International Journal of E-Health and Medical Communications Volume 11 , Issue 3.
- [7]. Sllame, A; Salama, N. 2021, "**Applying MPLS Technique as On-Chip Communication Means for Network-on-Chip with Mesh Topology**", PROCEEDING OF THE 28TH CONFERENCE OF FRUCT ASSOCIATIONM.
- [8]. Kalahroudi, P; Yaghoubi, E; Barekatin, B. 24 August 2020, "**IAM: an improved mapping on a 2-D network on chip to reduce communication cost and energy consumption**", Springer Science+Business Media, LLC, part of Springer Nature.
- [9]. Prasad, N; Mukherjee, P; Chattopadhyay, S; Chakrabarti, I.. 2018, "**Design and evaluation of ZMesh topology for on-chip interconnection networks**", Kharagpur, India, J. Parallel Distrib. Comput. 113 17–36.
- [10]. Ya-gang, W; Hui-min, D; Xu-bang, S. October 2011, "**Topological properties and routing algorithm for semi-diagonal torus networks**", The Journal of China Universities of Posts and Telecommunications, , 18(5): 64–70.

- [11]. Thakyal, D; Chatterjee, P. May 2016, "*Dia-Torus: A Novel topology for network-on-chip design*", International Journal of Computer Networks & Communications (IJCNC) Vol.8, No.3.
- [12]. Ouyang Y M, Zhu B, Liang H G, et al. 2009, "*Networks on chip based on diagonal interlinked mesh topology structure*", Computer Engineering, 35(22), pp. 100-102.
- [13]. Arora, L; Rajkumar. 2013, "*New Interconnection Network Topology Based on 2D Mesh*", IEEE International Advance Computing Conference (IACC).
- [14]. Zhu X J, Hu W W, Ma K, et al. 2007, "*XMesh: mesh-like topology for network on chip*", Journal of Software, 18(9): 2194-2204.
- [15]. Tatas, K; Jantsch, A; Siozios, K; Soudris, D. 2014, "*Designing 2D and 3D Network-on-Chip Architectures*". Springer New York Heidelberg Dordrecht London, 271P.
- [16]. Gunawan, I. 2014, "*Fundamentals of Reliability Engineering*", John Wiley & Sons, Federation University Australia, 181P.
- [17]. Dehghani, A; RahimiZadeh, K. 7 Sep, 2018, "*Design and Performance Evaluation of Mesh-of-Tree-based Hierarchical Wireless Network-on-Chip for Multicore Systems*", J. Parallel Distrib. Comput.
- [18]. Peratikou, A. April 2014, "*An optimised and generalised node for fat tree classes*". Doctoral of Philosophy of the University of Portsmouth, Lion Terrace, Portsmouth, Hampshire. PO1 3HE, United Kingdom.
- [19]. Sadiq, E. 2014, "*Short Message Network-On-Chip Interconnect for ASIC*". Master's thesis in system-on-chip design, Second Level. Stockholm, Sweden.