

تصميم خوارزمية توجيه FCM ضمن شبكات NoC واختبار أدائها مع الخوارزميات الحتمية والتكيفية

د. بلسم عيد* أ.د. محمد حجازية** آدم محفوظ***

(الإيداع: 14 آيار 2025، القبول: 28 تموز 2025)

الملخص:

يسمح الاختيار الأمثل لخوارزمية التوجيه ضمن الشبكات المدمجة على الشريحة بموازنة الحمل بشكل منتظم عبر القنوات. كما أن أداء خوارزمية التوجيه المطبقة في أي شبكة NoC يتحكم بشكل رئيسي بقيم جودة الخدمة التي يمكن تحقيقها، ومن هذا المنظور يجب مراعاة العديد من القضايا لتطوير خوارزميات توجيه جديدة، ويشمل ذلك فحص نقاط القوة والضعف والقدرات بالنسبة لخوارزميات التوجيه الحالية والشائعة. يسعى هذا البحث إلى بناء وتصميم خوارزمية توجيه مطورة تلائم بنية الشبكة FC-Mesh وطبيعة التوصيل المطبقة فيها، تعرف هذه الخوارزمية باسم FCM. ومن ثم اختبار فعالية هذه الخوارزمية مع خوارزميات التوجيه التكيفية والحتمية الملائمة لشبكة المصفوفات ثنائية البعد من خلال استدعاء هذه الخوارزميات بشكل ضمني مع الخوارزمية المقترحة بغية دراسة قيم بارامترات جودة الخدمة التي يمكن أن تحققها. أظهرت نتائج الاختبار أن مستويات جودة الخدمة التي حققتها الخوارزمية المقترحة FCM على طوبولوجيا FC-Mesh كانت تتغير مع تزايد الحمل، فقد كان أداء الخوارزمية المقترحة FCM مع الخوارزميات الحتمية هو الأفضل من حيث الإنتاجية وزمن التأخير لكن فقط عند الأحمال الصغيرة. بينما أظهرت خوارزمية FCM مع الخوارزميات المتكيفة كلاً عند الأحمال المتوسطة والعالية أداءً عالياً من حيث جودة الخدمة، فيما حققت الخوارزميات المتكيفة جزئياً نسب متفاوتة بجودة الخدمة تبعاً لحركة المرور المطبقة ولتغير معدل الحقن.

الكلمات المفتاحية: FC-Mesh، FCM، خوارزميات التوجيه، الإنتاجية، زمن التأخير

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

Design an FCM Routing Algorithm in NoC networks and Test its Performance with Deterministic and Adaptive Algorithms

Adam Mahfoud*** Dr. Mohammed Hijazieh** Dr. Balsam Eid*

(Received: 14 May 2025, Accepted: 28 July 2025)

Abstract:

The optimal selection of a routing algorithm in on-chip networks enables uniform load balancing across channels. The performance of the routing algorithm implemented in any NoC network primarily determines the achievable QoS values. From this perspective, several issues must be considered when developing new routing algorithms. This includes examining the strengths, weaknesses, and capabilities of existing and popular routing algorithms. This research aims to construct and design an improved routing algorithm that is suitable for the FC-Mesh network architecture and the connectivity nature of it. This algorithm, known as FCM, is then tested for its effectiveness relative to adaptive and deterministic routing algorithms suitable for two-dimensional matrix networks by implicitly invoking these algorithms with the proposed algorithm to study the achievable QoS parameters. Test results showed that the QoS levels achieved by the proposed FCM algorithm on the FC-Mesh topology varied with increasing load. FCM algorithm with deterministic algorithms performed best in terms of throughput and latency, but only at low loads. Meanwhile, FCM algorithm with fully adaptive algorithms demonstrated superior QoS performance at medium and high loads, Partially adaptive algorithms achieved varying quality of service ratios depending on the applied traffic and the injection rate.

Keywords :FC-Mesh, FCM, Routing Algorithms, Throughput, Latency

* 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.

*** Postgraduate Student (Ph.D) , Department of Computers and automatic control Engineering, Faculty of mechanical and electrical engineering, Latakia University, Latakia, Syria.

1- مقدمة:

نتيجة التعقيد الحاصل في نظم المعالجات المتعددة على الشرائح (MPSoCs) multi processors system-on-chip، ومع الارتفاع الهائل للمكونات وبروتوكولات الانترنت لا يزال من الصعب تلبية متطلبات الاتصال لتصميمات الشرائح المتعددة، كما بات مكلفاً للغاية أكثر من بنية الحوسبة ذاتها [A]، ومن هنا كانت الحاجة إلى بنية اتصالات جديدة، شكّلت فيما بعد اللبنة الأساسية الأولى لفكرة الشبكة على الشريحة (NoC) network-on-chip. فقد عززت شبكات NoC موضوع الاتصال ووفرت نطاقاً ترددياً عالي [B].

تعرف الشبكة المدمجة على الشريحة NoC على أنها نموذج قياسي للشرائح متعددة النوى [C] كبديل مطور عن شبكات الممرات التقليدية أو شبكات الربط المعتمدة على مفاتيح التبديل [D]، تستخدم لإنشاء اتصالات متبادلة بين مجموعة عقد ضمن نظام على رقاقة (SoC) system-on-chip، تتبادل مكونات الشبكة البيانات فيما بينها عبر روابط اتصال خاصة بينها [E]. لقد كان التركيز الأكبر للباحثين في هذا المجال ومازال منحصراً حول موضوع الاتصال، حيث يتعين على المصمم دراسة كافة العوامل والقيود والمؤثرات التي تحسن من أداء الاتصال وسرعته وجودته، وتعتبر خوارزمية التوجيه هي أحد أهم هذه العوامل كما أنها تُعتمد كمنهجية من المنهجيات المتبعة لتحسين جودة الخدمة (QoS) quality-of-service في الشبكات المدمجة على الشريحة، فقد كان التركيز على قضايا الاتصال أكبر من التركيز على قضايا الحوسبة بحد ذاتها. وتأتي أهمية خوارزمية التوجيه بكونها مسؤولة عن تحديد الاتصالية ضمن الشبكة، وحالات التكيف والجمود deadlock والقفول الحي livelock، وكذلك حالات التسامح مع الخطأ [F]. عموماً يمكن حصر متطلبات جودة الخدمة المطلوبة عند تصميم أي شبكة NoC في تحقيق الإنتاجية العالية وزمن التأخير المنخفض مع تحقيق قابلية التوسع والبرمجة. تعتمد دراسة تحسين QoS وسرعة الاتصالات في شبكات NoC بالتركيز على ثلاثة مناحي رئيسية وهي الطوبولوجيا والتوجيه والتحكم بالتدفق مع عدة خصائص وبارامترات مرتبطة بها [G].

يسعى هذا البحث إلى تحقيق مستويات جيدة لبارامترات جودة الخدمة المطلوبة لشبكات NoC من خلال تصميم خوارزمية توجيه مدركة للازدحام وملائمة لتنوع المسار تدعم جودة الخدمة QoS وفق مبدأ تقسيم الشبكة إلى شبكات فرعية. سيتم تطبيق هذه الخوارزمية على طوبولوجيا FC-Mesh. طوبولوجيا FC-Mesh هي بنية ربط فعالة معدلة عن الشبكة 2D-Mesh بإضافة عدد محدد وثابت من الوصلات تدعم قابلية التوسع ومُصممة خصيصاً للأحجام الكبيرة من الشبكات، وذلك بالاستفادة من الميزات الجيدة التي تتمتع بها طوبولوجيا FC-Mesh، ومن ثم سنقوم باختبار أداء الخوارزمية المقترحة مع بعض خوارزميات التوجيه التكيفية والحتمية ضمن سيناريوهات مختلفة متعلقة بالعدد الكلي للعقد ومعدل الحمل ونمط حركة المرور المطبق ضمن الشبكة.

2- أهمية البحث وهدفه:

يستند البحث على عاملين رئيسيين من العوامل المؤثرة على أداء جودة الخدمة في شبكات NoC وهما الطوبولوجيا وخوارزمية التوجيه، فالطوبولوجيا تحدد المسارات الفيزيائية التي تربط بين العقد، بينما تحدد خوارزمية التوجيه المسار الذي ستسلكه حزمة البيانات أو الباكييت (packet) من المصدر إلى الهدف، وعدد المسارات المحتملة التي يمكن أن يسلكها الباكييت للوصول إلى وجهته. يهدف البحث إلى بناء وتصميم خوارزمية توجيه مطورة سيتم تسميتها FCM، هذه الخوارزمية مصممة لملائمة بنية التوصيل الموجودة في طوبولوجيا FC-Mesh، ومن ثم ستتم مقارنة أداء بعض خوارزميات التوجيه التكيفية والحتمية من خلال استدعاء هذه الخوارزميات ضمناً كخوارزميات فرعية من الخوارزمية المقترحة FCM وذلك بغية دراسة تأثير هذه الخوارزميات جنباً إلى جنب مع الخوارزمية المقترحة على بارامترات جودة الخدمة (الإنتاجية وزمن التأخير) بالنسبة لطوبولوجيا FC-Mesh، مما يساهم في تحقيق مستويات جيدة ومرغوبة لقيم بارامترات جودة الخدمة بالنسبة لشبكات NoC.

3- الدراسات المرجعية:

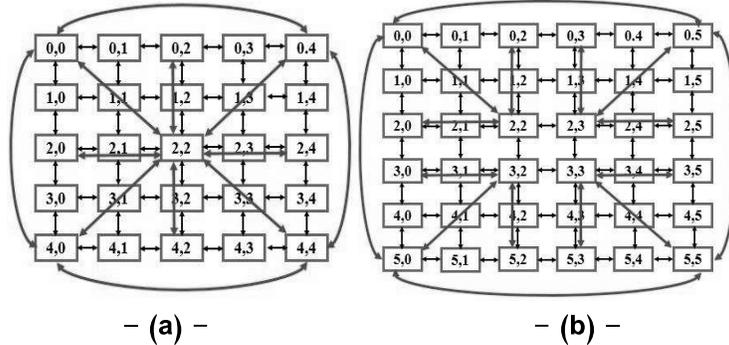
ساهمت العديد من الدراسات البحثية والأكاديمية في مجال الشبكات المدمجة على الشريحة بتقديم العديد من الأساليب والمنهجيات والطرائق العلمية بغية تحسين جودة الخدمة لهذا النوع من الشبكات. من بين هذه الأساليب والطرق كان تصميم وتطوير خوارزميات توجيه تدعم بارامترات جودة الخدمة وتحسن الأداء العام للشبكة. قامت الدراسة [H] بتصميم خوارزمية توجيه (MPLS) على شبكة NoC وفق طوبولوجيا Mesh و fat-tree، وقد أثبتت الدراسة أن خوارزمية MPLS تدعم جودة الخدمة من حيث الإنتاجية وزمن التأخير، كما تبين أن تطبيق MPLS على طوبولوجيا fat-free يتفوق على طوبولوجيا Mesh من حيث متوسط زمن الوصول للحزمة. وقد كانت البنية المصممة أفضل بخمس مرات من حيث الإنتاجية فيما لو تم التصميم بالاعتماد على القنوات الافتراضية. كما كان هناك تخفيض بمقدار 1.5 من حيث زمن التأخير. تم تطوير خوارزمية هجينة (Scorn) مدركة للازدحام وتعتمد على اختيار المسار وفق خوارزمية الجار الأقرب في الدراسة [I]، من خلال استخدام محلل لفحص حزم حركة المرور ضمن الشبكة ومن ثم تحديد مناطق محلية اعتماداً على عدد القفزات. أثبتت الخوارزمية المقترحة بالمقارنة مع الخوارزميات المماثلة لألية العمل انخفاضاً في زمن وصول الحزمة بنسبة 38%، وزيادة الإنتاجية بنسبة 20%. تم بناء وتصميم خوارزمية توجيه منخفضة الكلفة وخالية من الأخطاء تسمى (TFRF) لشبكات NoC وتعتمد توجيه قائم على المنطق وذلك في الدراسة [J]، حيث أظهرت TFRF أنها تمتلك أداء أفضل وموثوقية محسنة وأعباء أقل مقارنةً بأحدث مخططات التوجيه الموثوقة الداخلة معها بالمقارنة. حسنت خوارزمية TFRF قيم بارامترات جودة الخدمة من خلال تقليل زمن التأخير بمقدار 6.48%، وتم تحسين الإنتاجية بمعدل 1.67%. في الدراسة [K] تم إجراء تقييم لخوارزميات التوجيه بغية تحقيق جودة الخدمة في شبكات NoC، حيث تبين أن خوارزمية XY تحتل المرتبة الأولى من حيث الأداء الأفضل من حيث الإنتاجية وزمن التأخير تليها خوارزمية DyAD من بين ست خوارزميات توجيه تمت مقارنتها (XY, WF, NL, NF, OE, DyAD) وذلك وفق نمط حركة المرور Hotspot Traffic. قامت الدراسة [L] بمقارنة خوارزميات XY و WF و OE مع خوارزمية WF تدعم التتبع العكسي في التوجيه. تمت المحاكاة باستخدام Xilinx على طوبولوجيا Mesh بحجم (3×3)، وقد تبين أن خوارزمية WF مع آلية تتبع عكسي أفضل من حيث البساطة، والقدرة على التكيف، وكفاءة استخدام الموارد. في الدراسة [M] تمت مقارنة أربع خوارزميات توجيه حتمية وتكيفية هي XY، YX، Odd-Even و DyAD من حيث نقاط قوتها ونقاط ضعفها في ظروف مختلفة، أظهرت نتائج المقارنة ميزات هذه الخوارزميات من حيث آلية اتخاذ قرار التوجيه، وتم تحليل منهجية اختيار المدخلات والمخرجات بالنسبة لهذه الخوارزميات، وطرح أفكار لتطوير خوارزميات توجيه جديدة. تم بناء وتصميم خوارزمية توجيه (Invasive Weed Optimization) IWO في الدراسة [N]، وقد أظهرت النتائج مقارنةً مع عدة خوارزميات توجيه أخرى تحسين بكلفة الاتصال وتحسين الإنتاجية وتقليل من زمن التأخير، حيث خفّضت خوارزمية IWO من زمن التأخير بمقدار 5، 5، 4، 11 بالمائة مقارنة بخوارزميات NMAP، CASTNET، CMAP، OnYX على الترتيب، أما بالنسبة للإنتاجية فقد حسنت IWO معدل الإنتاجية بمقدار 4، 9، 9، 10 بالمائة مقارنة بخوارزميات NMAP، CASTNET، CMAP، OnYX على الترتيب.

جاءت فكرة البحث من تقاطع عدة أفكار معاً وهي: أولاً الانطلاق من بنية توصيل مطورة تشكل بنية تحتية للتوصيل المتكامل لشبكات NoC تدعم قابلية التوسيع، وهي بنية (FC-Mesh) في بحثنا، ثانياً بناء وتصميم خوارزمية توجيه تلائم طبيعة الطوبولوجيا FC-Mesh وتحقق تنوعاً بالمسار وتعتمد فكرة التقسيم الشبكي للشبكة الأساسية إلى شبكات فرعية، ثالثاً الاستفادة من ميزات وخصائص خوارزميات التوجيه التكيفية والحتمية التي تدعمها البنية Mesh وتضمنها ضمن الخوارزمية المقترحة كخوارزميات فرعية بغية المقارنة فيما بينها من حيث مستويات جودة الخدمة التي تحققها كل من هذه الخوارزميات بالنسبة لطوبولوجيا FC-Mesh، وذلك انطلاقاً من مبدئين اثنين:

1. بالإمكان توظيف خوارزميات التوجيه الحتمية وتقليل زمن الوصول دون أية تغييرات أو تعديلات إجرائية على طوبولوجيا FC-Mesh وإنما من خلال الاستفادة من الروابط المضافة على البنية المدروسة (FC-Mesh).
2. وفقاً للدراسات المرجعية فقد حققت خوارزميات التوجيه التكميلية أداءً عالياً، ويمكن الوصول إلى مستويات جودة الخدمة المطلوبة بحال تم تطبيق هذه الخوارزميات على طوبولوجيا محسنة.

4- المواد وطرائق البحث:

سنقوم في الدراسة العملية من هذا البحث ببناء وتصميم خوارزمية توجيه مطورة تعرف باسم FCM، وتأتي تسميتها من تسمية الطوبولوجيا التي تدعمها وهي طوبولوجيا (FC-Mesh) Full Connected Mesh، تعتبر طوبولوجيا FC-Mesh [O] بنية محسنة ومعدلة عن شبكة Mesh ثنائية البعد بإضافة عدد ثابت ومحدد من الوصلات على شبكة Mesh، حيث يتم وصل مركز الشبكة Mesh مع العقد بالزوايا الأربعة بأربعة وصلات، وأيضاً مركز الشبكة مع العقد في منتصف الحواف الأربعة للشبكة بأربعة وصلات، بالإضافة إلى أربع وصلات إضافية تربط الزوايا الأربعة مع بعضها. يبين الشكل (1) بنية الشبكة FC-Mesh من أجل حجم شبكة مختلف (يبين الشكل (1-a) طوبولوجيا FC-Mesh بحجم شبكة زوجي (6×6) وعدد العقد الكلي (N=36) وعدد الوصلات المضافة باللون الأحمر 16 وصلة ثابتة- يبين الشكل (1-b) طوبولوجيا FC-Mesh بحجم شبكة فردي (5×5) وعدد العقد الكلي (N=25) وعدد الوصلات المضافة باللون الأحمر 12 وصلة ثابتة). يتم بناء شبكة FC-Mesh بحجم (n×n) حيث كل عقدة لها تموضع فيزيائي معين ضمن الشبكة وبإحداثيات سطر وعمود مميز. يبدأ ترقيم العقد بدءاً من العقدة (0,0) ثم (0,1) وهكذا حتى نهاية أول سطر بالعقدة رقم (0,n-1). ثم بنفس الترقيم لبقية الأسطر ضمن الشبكة Mesh حتى الانتهاء بالعقدة (n-1,n-1) بالعمود والسطر الأخيرين. إن 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 FC-Mesh المربعة التي يكون فيها عدد الأسطر يساوي عدد الأعمدة). بالنسبة للشبكة FC-Mesh ذات الحجم الزوجي (عدد العقد الزوجي) فإن المركز هو عبارة عن أربعة عقد وتكون مواضع العقد المركزية هي $\{(n/2-1, n/2-1), (n/2, n/2-1), (n/2, n/2), (n/2-1, n/2)\}$ والعقد بالزوايا الأربعة تأخذ المواقع $(n-1, 0), (n-1, n), (0, n-1), (0, 0)$ {1}. الأمر نفسه بالنسبة للشبكة FC-Mesh ذات الحجم الفردي (عدد العقد الفردي)، لكن المركز هنا هو عبارة عن عقدة واحدة ويكون موقع هذه العقدة هو $(n-1/2, n-1/2)$.



الشكل رقم (1): a - شبكة FC-Mesh بحجم شبكة زوجي (6×6) - b - شبكة FC-Mesh بحجم شبكة فردي (5×5)
4-1 تصميم خوارزمية التوجيه FCM:

سيتم تسمية الخوارزمية المقترحة بخوارزمية FCM كونها تلائم البنية (FC-Mesh) Full Connected Mesh وتلائم الوصلات الإضافية المضافة إلى طوبولوجيا Mesh. وستتم دراسة أداء هذه الخوارزمية بالنسبة لبارامترات جودة الخدمة وذلك على البنية FC-Mesh ومقارنة أداؤها مع خوارزميات التوجيه الحتمية والتكميلية، حيث سيتم دمج خوارزمية التوجيه

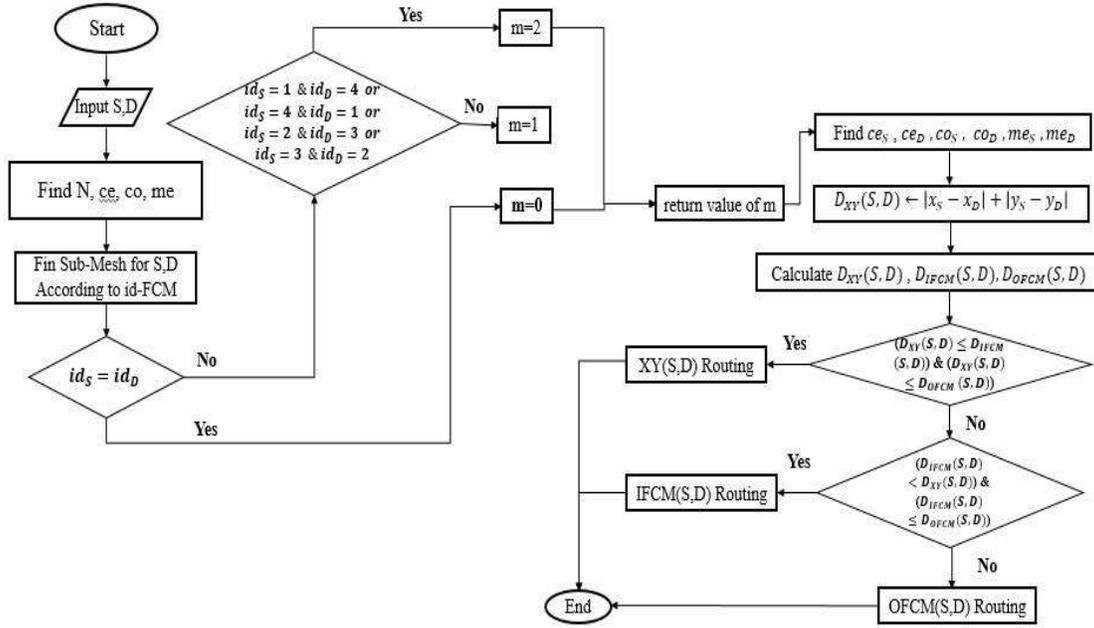
الاحتمية (XY) وخوارزميات التوجيه المتكيفة جزئياً وكلياً المعتمدة على نموذج الدوران (WF,NL,NF,OE) مع الخوارزمية المقترحة ومن ثم مقارنة أداء هذه الخوارزميات من حيث الإنتاجية وزمن التأخير.

تعتمد الخوارزمية المقترحة مبدأ تقسيم الشبكة إلى شبكات فرعية محددة ومرقمة من 1 إلى 4. وعليه سيتعين كخطوة أولى تحديد عقد المركز والزوايا وعقد منتصف الحواف للشبكة الأساسية (ce, co, me) على الترتيب اعتماداً على حجم الشبكة N، ومن ثم تحديد رقم الشبكة الفرعية لعقدتي المصدر والهدف (ids, idD)، وعلى هذا الأساس سيتولد عقد مركز وزوايا وعقد منتصف حواف جديدة لكل من الشبكة الفرعية للمصدر (ces, cos, mes) وللشبكة الفرعية للهدف (ced, cod, meD). إن تحديد رقم الشبكة الفرعية لعقدتي المصدر والهدف سيمكّن من تحديد عدد الوصلات الخارجية التي تفصل بين زاوية الشبكة الفرعية للمصدر وزاوية الشبكة الفرعية للهدف والتي سيرمز لها بالرمز m.

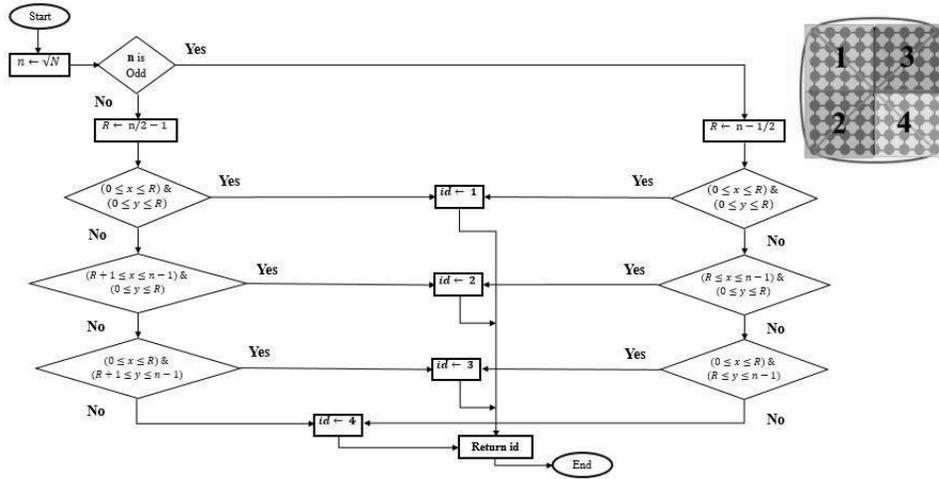
تسمح الخوارزمية المقترحة بالانتقال عبر ثلاثة مسارات ضمن طوبولوجيا FC-Mesh. يتم اختيار مسار واحد من بين هذه المسارات تبعاً لإحداثيات عقدتي المصدر والهدف، وذلك وفقاً للشبكة الفرعية التي تضم عقدتي المصدر والهدف. وهذه المسارات هي: مسار انتقال داخلي (Inner) يتبع هذا المسار خوارزمية فرعية سيتم تسميتها (IFCM) سيتم استدعاؤها ضمن إجرائية الخوارزمية الرئيسية FCM، ويتحقق الانتقال وفق هذه الخوارزمية الفرعية عبر الوصلات الداخلية الإضافية التي تصل المركز مع زوايا الشبكة، والوصلات التي تصل المركز مع منتصف الحواف. أما المسار الثاني فهو مسار انتقال خارجي (Outer) يتبع هذا المسار خوارزمية فرعية (OFCM) أيضاً سيتم استدعاؤها ضمن إجرائية الخوارزمية الرئيسية FCM، ويمكن الانتقال من خلال هذه الخوارزمية عبر نفس الوصلات المستخدمة في انتقال (IFCM) بالإضافة إلى الوصلات الأربعة الخارجية التي تفصل بين العقد بالزوايا الأربعة للشبكة، والمسار الثالث هو مسار الانتقال عبر وصلات الشبكة الأساسية (الأفقية والرأسية) التي تصل بين عقد الشبكة، ويتبع هذا المسار إحدى الخوارزميات الاحتمية والتكيفية الخالية من الجمود الداخلة في دراستنا، حيث إن هذه الخوارزميات تناسب الانتقال الأفقي والعمودي بالجهات الأربعة لطوبولوجيا Mesh، وهذه الخوارزميات هي الاحتمية (XY) والمتكيفة جزئياً (WF,NL,NF) والمتكيفة كلياً (OE). مع التنويه إلى أنه سيتم اعتماد خوارزمية XY ضمن الخوارزمية المقترحة وضمن الأشكال فقط. لكن عموماً ستكون الدراسة العملية والمقارنة ودراسة أداء الخوارزمية المقترحة بالنسبة لجميع الخوارزميات الخالية من الجمود الخمسة (XY,WF,NL,NF,OE) المذكورة أعلاه. إن العلاقة الرياضية المطبقة لحساب المسافة بين إحداثيي عقدتي المصدر والهدف تعتبر الشرط الأساسي في اختيار الخوارزمية الأنسب من بين خوارزميات (IFCM,OFCM,XY)، والتي تحدد أقصر مسار يمكن الانتقال خلاله، وهذه العلاقة محددة بالمعادلة الرياضية (1):

$$(1) D_{XY}(S, D) = |x_S - x_D| + |y_S - y_D|$$

حيث $(x_S, y_S), (x_D, y_D)$ هي إحداثيات المحور الأفقي والعمودي لعقدة المصدر S ولعقدة الهدف D على الترتيب. تقوم الخوارزمية بحساب ثلاثة توابع هي: $D_{OFCM}, D_{IFCM}, D_{XY}$ ، ثم تتم المقارنة بين قيم هذه التوابع لاختيار أصغرها بغية اتباع المسار الأقصر. ففي حالة $D_{XY} \leq D_{OFCM}$ و $D_{XY} \leq D_{IFCM}$ يتم اتباع خوارزمية XY، أما بحالة $D_{IFCM} < D_{OFCM}$ و $D_{XY} \leq D_{OFCM}$ يتم اتباع خوارزمية IFCM، وفي غير ذلك يتم اتباع خوارزمية OFCM، بمعنى أن أولوية الانتقال تكون عبر الخوارزمية XY (أو أحد الخوارزميات التكيفية الداخلة بالدراسة) تليها خوارزمية IFCM، وتكون الأولوية الأخيرة في الانتقال خوارزمية OFCM وذلك للتقليل قدر الإمكان من التوجيه عبر الوصلات الطويلة. يبين الشكل (2) خوارزمية FCM المقترحة، ويبين الشكل (3) المخطط الصندوقي لخوارزمية تحديد الشبكة الفرعية لعقدتي المصدر والهدف، موضعاً فيه آلية ترقيم الشبكات الفرعية الأربعة المقسمة لطوبولوجيا FC-Mesh.



الشكل رقم (2): المخطط الصندوقي لمراحل خوارزمية FCM المقترحة

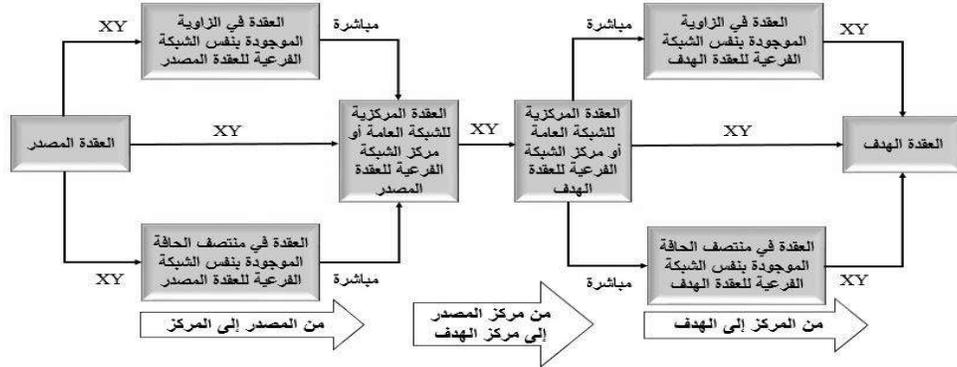


الشكل رقم (3): المخطط الصندوقي لخوارزمية تحديد الشبكة الفرعية لعقدتي المصدر والهدف

تنتقل حزمة البيانات في خوارزمية IFCM من عقدة المصدر إلى العقدة المركزية الكائنة في مركز الشبكة الفرعية للعقدة المصدر عبر ثلاثة احتمالات، إما من خلال الانتقال عبر خوارزمية XY من خلال الوصلات الأفقية والعمودية، أو بالانتقال عبر خوارزمية XY عبر الوصلات الأفقية والعمودية باتجاه العقدة في الزاوية الموجودة بنفس الشبكة الفرعية للعقدة المصدر، ومن ثم من عقدة الزاوية إلى العقدة المركزية عبر الوصلة المائلة بين الزاوية والمركز، والاحتمال الثالث للانتقال يتم من العقدة المصدر باتجاه عقدة منتصف الحافة الموجودة بنفس الشبكة الفرعية للعقدة المصدر عبر خوارزمية XY عبر الوصلات الأفقية والعمودية، ومن ثم من عقدة منتصف الحافة إلى العقدة المركزية عبر الوصلة المضافة في طوبولوجيا FC-Mesh. بعدها تنتقل الحزم من العقدة المركزية للشبكة الفرعية للعقدة المصدر إلى العقدة المركزية للشبكة الفرعية للعقدة الهدف (بحالة عدد العقد الكلي زوجي). ستتجه الحزم الآن باتجاه العقدة الهدف من مركز الشبكة الفرعية للعقدة الهدف عبر ثلاثة احتمالات، إما من خلال الانتقال عبر خوارزمية XY باستخدام الوصلات الأفقية والعمودية، أو بالانتقال باتجاه العقدة في الزاوية

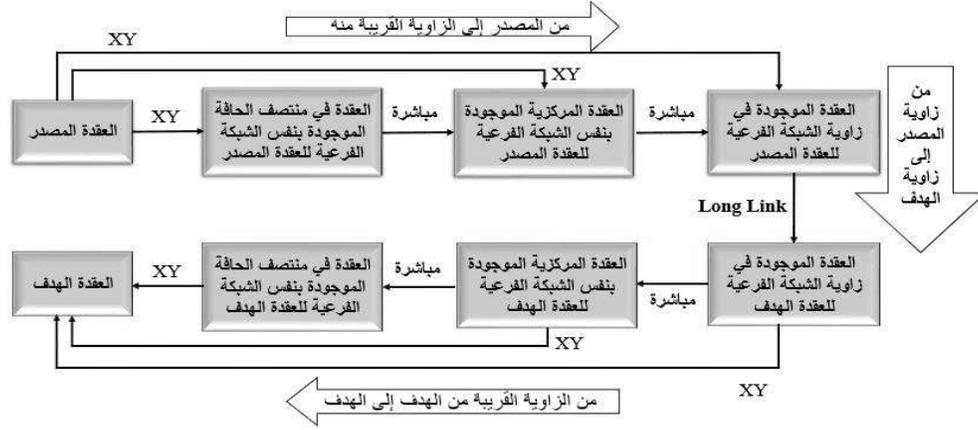
الموجودة بنفس الشبكة الفرعية للعددة الهدف من خلال الوصلة التي تصل المركز بالزاوية، ثم الانتقال من عقدة الزاوية إلى عقدة الهدف ذاتها عبر خوارزمية XY، أما الاحتمال الثالث للانتقال يحول الحزم باتجاه العقدة في منتصف الحافة الموجودة بنفس الشبكة الفرعية للعددة الهدف من خلال الوصلة المضافة التي تصل المركز بمنتصف الحافة في طوبولوجيا FC-Mesh، ثم عبر خوارزمية XY تنتقل الحزم من منتصف الحافة إلى العقدة الهدف النهائية عبر خوارزمية XY باستخدام الوصلات الأفقية والعمودية، يبين الشكل (4) مخطط صندوقي يوضح احتمالات الانتقال ضمن طوبولوجيا FC-Mesh وفق الخوارزمية الفرعية IFCM.

يتم الانتقال في خوارزمية OFCM من عقدة المصدر إلى العقدة الكائنة في زاوية الشبكة الفرعية للعقدة المصدر عبر ثلاثة احتمالات، إما عبر خوارزمية XY عن طريق الوصلات الأفقية والعمودية، أو من خلال الانتقال عبر خوارزمية XY باتجاه عقدة المركز، ومن ثم من عقدة المركز إلى العقدة في الزاوية مباشرة عبر الوصلة المائلة الواصلة بين الزاوية والمركز، والاحتمال الثالث يتم من العقدة المصدر باتجاه عقدة منتصف الحافة الموجودة بنفس الشبكة الفرعية للعقدة المصدر عبر خوارزمية XY، ومن ثم من عقدة منتصف الحافة إلى العقدة المركزية مباشرة، ثم من عقدة المركز



الشكل رقم (4): احتمالات الانتقال ضمن طوبولوجيا FC-Mesh وفق الخوارزمية الفرعية IFCM

إلى العقدة في الزاوية. بعدها تنتقل الحزم من العقدة الموجودة في زاوية الشبكة الفرعية للعقدة المصدر نحو العقدة الموجودة في زاوية الشبكة الفرعية للهدف عبر الوصلات الطويلة long link تبعا لقيمة m (ضمن الخوارزمية). ستتجه الحزم بعدها باتجاه العقدة الهدف انطلاقاً من زاوية الشبكة الفرعية للعقدة الهدف عبر ثلاثة احتمالات، إما تبعاً لخوارزمية XY، أو من خلال الانتقال باتجاه عقدة المركز، ثم إلى عقدة الهدف ذاتها عبر خوارزمية XY، أما الاحتمال الثالث للانتقال يحول الحزم باتجاه المركز عبر الوصلة المائلة مباشرة، ثم نحو العقدة في منتصف الحافة بنفس الشبكة الفرعية للعقدة الهدف، ثم عبر خوارزمية XY تنتقل الحزم إلى العقدة الهدف النهائية، وفق ما هو مبين بالشكل (5).



الشكل رقم (5): احتمالات الانتقال ضمن طوبولوجيا FC-Mesh وفق الخوارزمية الفرعية OFCM

2-4 دراسة أداء خوارزمية FCM المقترحة مع خوارزميات التوجيه الخالية من الجمود على شبكة FC-Mesh: سيتم بهذا القسم دراسة جودة الخدمة لخوارزميات التوجيه الخالية من الجمود الحتمية (XY)، والخوارزميات القائمة على نموذج الدوران والتمكيفة جزئياً (WF,NL,NF)، والخوارزميات القائمة على نموذج الدوران والتمكيفة كلياً (OE)، وذلك على طوبولوجيا FC-Mesh بدمج هذه الخوارزميات الخمسة مع الخوارزمية المقترحة FCM كل منها على حدة، من خلال استبدال خوارزمية التوجيه المستخدمة عند الانتقال عبر الوصلات الأفقية والرأسية في طوبولوجيا FC-Mesh بخوارزميات فردي (9×9) وزوجي (10×10)، وضمن ثلاثة أنماط لحركة المرور هي: حركة المرور الموحدة العشوائية Random Uniform، ونمط مرور انعكاس البت Bit Reversal، ونمط حركة مرور تبديل البت Shuffle Bit. البارامترات المشمولة بدراسة الأداء هي بارامترات جودة الخدمة وهي الإنتاجية Throughput، وزمن الاستجابة (زمن الوصول) Latency. سنقوم بإجراء المحاكاة التجريبية بالمقارنة مع النسبة المئوية للحمل المطبق على الشبكة بأخذ أربعة أحمال: ضعيف (20%)، متوسط (50%)، عالي (80%)، وحمل كامل (100%) باستخدام المحاكى NS2 [P]، وهو أحد أشهر برامج محاكاة الشبكات حيث يختص بدراسة شبكات الاتصالات ومحاكاة شبكات NoC استناداً إلى لغة ++C مع تقنية الأحداث المنفصلة كائنية التوجه (OTCI) [Q]. تتحدد المعادلات المميزة لبارامترات جودة الخدمة بالعلاقتين الرياضيتين (2) و (3) [R] الممثلتين للإنتاجية وزمن التأخير على الترتيب:

$$(2) \quad Throughput = \frac{total\ packets\ received \times packet\ length}{number\ of\ nodes \times total\ time}$$

حيث $total\ packets\ received$ إجمالي الحزم المستلمة أي عدد الحزم التي تصل بنجاح إلى الوجهة، $packet\ length$ هو طول الحزمة ويقاس بوحدة flit، $number\ of\ nodes$ هو عدد العقد الكلي، أما $total\ time$ فهو زمن المحاكاة ويقاس بـ clock cycles. والعلاقة (3) المعبرة عن حساب زمن التأخير الممثل للزمن (عدد دورات الساعة) المطلوب لانتقال الحزمة إلى من المصدر إلى الوجهة:

$$packet\ latency = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N Packet\ Latency_i \quad (3)$$

حيث تمثل N عدد الحزم التي وصلت إلى عقدة الوجهة، و $Packet\ Latency_i$ زمن التأخير الباكييت ذو الرقم i.

5- سيناريوهات العمل:

قمنا بإجراء محاكاة للخوارزمية المقترحة FCM على الشبكة FC-Mesh بحجم مختلفة ضمن بيئة ubuntu بناءً على الشروط التجريبية المذكورة سابقاً، من خلال تطبيق بارامترات الاختبار التجريبية على المحاكى بالنسبة لطوبولوجيا FC-Mesh بحجمين مختلفين (9×9) و(10×10). تم توصيل كل عقدة بمولد حركة المرور CBR معدل البت الثابت (Constant Bit Rate) بقيمة 32 GBps. مع اختيار عمق المخزن المؤقت (عدد المخازن المؤقتة) لقناة الإدخال FIFO بقيمة 32، وتطبيق 4 قنوات افتراضية لكل قناة. طول الوصلة 3um، وطول البايت 1000 بايت مع تطبيق فاصل زمني لدورتين على مدار الساعة وتردد ساعة 1 جيجاهرتز خلال زمن محاكاة 2000 c/cycles. تم الحصول على نتائج المحاكاة من أجل معدل زمن التأخير Latency، ومعدل الإنتاجية Throughput ضمن سيناريوهين اثنين يتعلقان بعدد العقد الكلي للشبكة وقد كانت النتائج وفق الآتي:

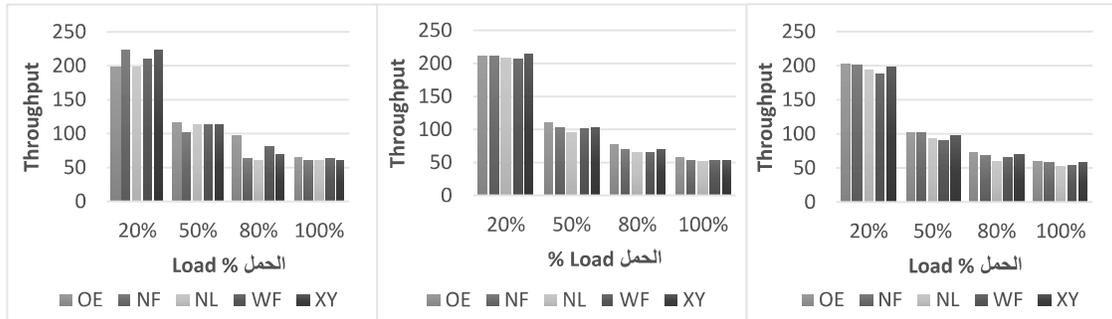
5-1 السيناريو الأول: من أجل شبكة بحجم فردي 9×9 (81 عقدة):

عند تطبيق نمط حركة المرور الموحدة العشوائية بعدد عقد فردي (81 عقدة) كانت إنتاجية خوارزمية NF هي الأفضل عند الأحمال الصغيرة تليها خوارزمية XY ثم WF ثم OE. عند الأحمال المتوسطة والعالية كانت OE هي الأفضل تليها WF ثم XY ثم NF بينما إنتاجية NL الأقل دوماً. حققت OE إنتاجية أفضل من XY، WF، NF، NL بنسبة 42.2%، 53.2%، 59.8%، 18.7% على الترتيب. أما عند تطبيق نمط حركة مرور انعكاس البت كانت إنتاجية XY هي الأفضل عند الأحمال الصغيرة، بينما من أجل الأحمال المتوسطة والعالية كانت OE هي الأفضل إنتاجية، حيث تفوقت OE على خوارزميات XY، WF، NF، NL بنسبة 11.3%، 19.5%، 18.9%، 9.9% على الترتيب. أما عند نمط حركة تبديل البت كانت إنتاجية OE هي الأفضل تليها إنتاجية NF ثم XY ثم NL بينما كانت إنتاجية WF الأصغر دوماً وكل ذلك عند الأحمال الصغيرة والمتوسطة، أما عند الحمل العالي والكامل كانت إنتاجية OE الأفضل تليها XY، بتحسين قدره 4.5%، 8.2%، 21.4%، 8.5% مقارنةً بإنتاجية XY، WF، NF، NL على الترتيب. يبين الشكل (6) إنتاجية الخوارزمية المقترحة FCM مع الخوارزميات المدروسة على طوبولوجيا FC-Mesh.

(A)-

(B)-

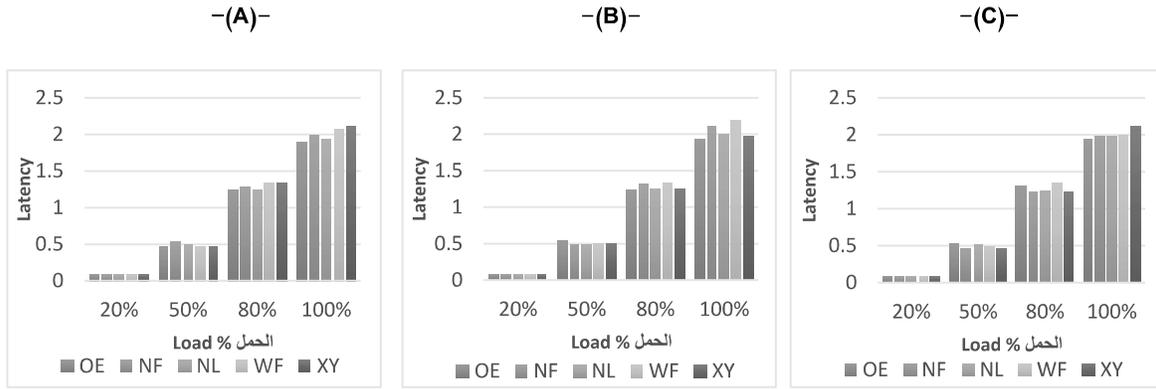
(C)-



الشكل (6): معدل الإنتاجية للخوارزمية المقترحة FCM مع الخوارزميات المدروسة عند أحمال مختلفة وتحت نمط

حركة المرور: (A: الموحدة العشوائية - B: انعكاس البت - C: تبديل البت) من أجل شبكة بحجم فردي (9×9) يبين الشكل (7) زمن التأخير للخوارزمية المقترحة FCM والخوارزميات المدروسة، حيث إنه عند تطبيق حركة المرور الموحدة العشوائية تبين أن زمن التأخير بالنسبة لخوارزميات OE و WF و XY هو نفسه 0.48 وهو أفضل زمن تأخير كونه الأقل وذلك من أجل الأحمال المتوسطة، بينما كان زمن تأخير NF عالياً، كذلك الأمر عند الأحمال العالية فقد كان زمن تأخير XY يتزايد مقارنةً ببقية الخوارزميات الأخرى، وحافظت OE و NL على زمن تأخير هو الأقل بنسبة تتراوح بين 3.2% - 8%. أما عند تطبيق نمط حركة مرور انعكاس البت كانت أزمنة التأخير متساوية تقريباً عند الأحمال الصغيرة، بينما

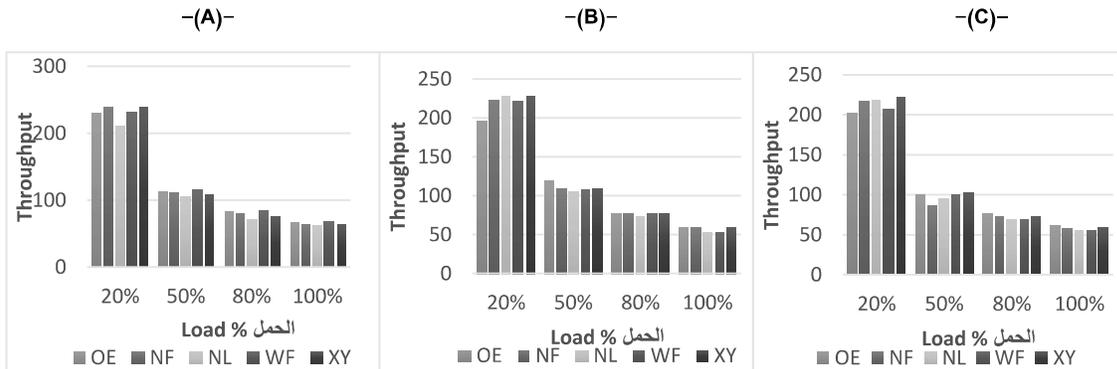
من أجل الأحمال المتوسطة كانت قيم أزمنة التأخير لخوارزميتي NF و NL هي الأقل. عند الحمل العالي كانت OE هي الأقل تأخيراً تليها XY ثم NL، حيث تفوقت خوارزمية OE من حيث زمن التأخير على باقي الخوارزميات بنسبة محصورة ضمن المجال [6.4-7.2]. وأخيراً وعند تطبيق نمط حركة مرور تبديل البت وجدنا أن خوارزمتي XY و NF حققتا أقل زمن تأخير عند الأحمال المتوسطة والعالية بنسبة [2.4-11.3]، أما عند معدل الحقن الكامل للشبكة فقد كانت خوارزمية OE هي الأقل بزمن التأخير بمعدل وسطي 7.2%.



الشكل رقم (7): زمن التأخير للخوارزمية المقترحة FCM مع الخوارزميات المدروسة عند أحمال مختلفة وتحت نمط حركة المرور: (A) الموحدة العشوائية – B: انعكاس البت – C: تبديل البت) من أجل شبكة بحجم فردي (9×9)

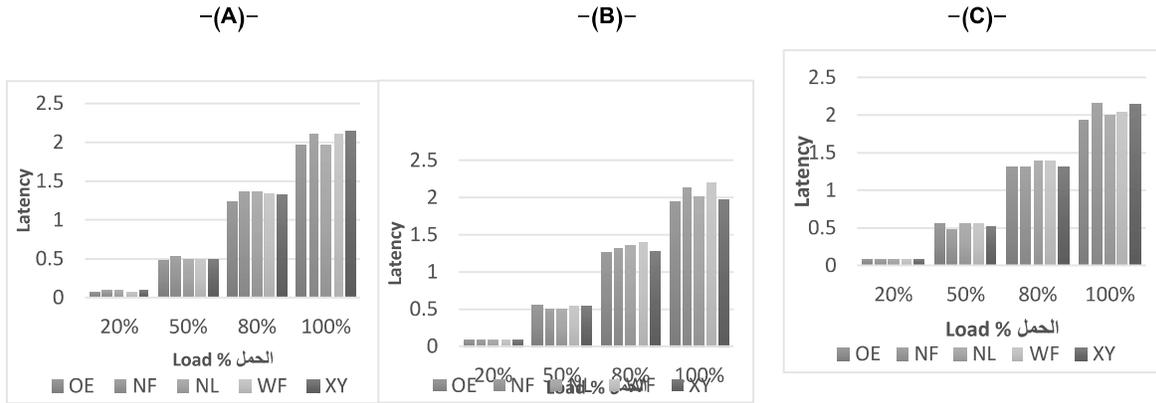
2-5 السيناريو الثاني: من أجل شبكة بحجم زوجي 10×10 (100 عقدة):

قمنا في هذا السيناريو بدراسة بارامترات جودة الخدمة للخوارزمية المقترحة بالنسبة للشبكة FC-Mesh بحجم 10×10. كما يظهر الشكل (8) فإنه وعند تطبيق نمط حركة المرور الموحدة العشوائية كانت إنتاجية NF هي الأفضل بالنسبة للأحمال الصغيرة تليها خوارزمية XY ثم WF ثم OE. عند الحمل المتوسط والعالي كانت WF ذات الإنتاجية الأفضل تليها OE ثم NF محسنة من إنتاجية الشبكة FC-Mesh بمعدل 1.2%, 4.8%, 14.3%, 8.7% مقارنة بخوارزميات XY, NL, OE, NF, على الترتيب. أما عند نمط انعكاس البت كانت إنتاجية XY الأفضل عند الأحمال الصغيرة، بينما من أجل الحمل المتوسط والعالي كانت OE هي الأفضل إنتاجيةً، حيث حسنت خوارزمية OE الإنتاجية بنسبة (2%, 2.3%, 4.9%) بالمقارنة مع XY, WF, NL, NF على الترتيب. عند تطبيق نمط حركة مرور تبديل البت كانت إنتاجية XY هي الأفضل تليها إنتاجية NL ثم NF، ومع زيادة معدل الحقن وعند الحمل المتوسط تحديداً بقيت إنتاجية XY هي الأفضل تليها إنتاجية WF و OE، أما عند الحمل العالي كانت إنتاجية OE الأفضل.



الشكل (8): إنتاجية الخوارزمية المقترحة FCM مع الخوارزميات المدروسة عند أحمال مختلفة وتحت نمط حركة المرور: (A): الموحد العشوائية – B: انعكاس البت – C: تبديل البت) من أجل شبكة بحجم زوجي (10×10)

تبين عند دراسة زمن التأخير وفق ما هو موضح بالشكل (9) أنه عند تطبيق حركة المرور الموحد العشوائية كان زمن تأخير خوارزمية OE هو الأقل على عكس NL و NF، كذلك الأمر عند الحمل العالي فقد بقي زمن تأخير OE أفضل من XY و WF و NF و NL بنسبة (6.4%, 8%, 9.6%, 9.6%) على الترتيب. من أجل نمط حركة مرور انعكاس البت كان زمن تأخير NF هو الأقل يليه زمن تأخير NL ثم XY يليه WF. بينما مع زيادة معدل الحقن كانت OE هي الأقل تليها XY ثم NF تليها NL وأخيراً WF، حيث تفوقت OE على WF، NF، NL، XY بمعدل (10.3%, 7.9%, 5.5%, 1%) على التوالي. عند تطبيق نمط حركة مرور تبديل البت كانت NF أقل زمن تأخير تليها XY عند الأحمال المتوسطة، وكانت عندها قيم أزمنة التأخير لبقية الخوارزميات الأخرى متساوية. عند تطبيق حمل عالي على الشبكة كان زمن تأخير XY هو الأقل يليه OE ثم NF، حيث كان زمن تأخير XY و OE أفضل من أزمنة تأخير الخوارزميات الأخرى بنسب تتراوح بين % [1.5–6.1]، لكن مع زيادة معدل الحقن على الشبكة ليصل ذروته تراجع أداء خوارزمية التوجيه الحتمية XY حيث أصبح زمن تأخيرها أكبر من WF و NL و OE.



الشكل رقم (9): زمن تأخير الخوارزمية المقترحة مع الخوارزميات المدروسة عند أحمال مختلفة وتحت نمط حركة المرور: (A): الموحد العشوائية – B: انعكاس البت – C: تبديل البت) من أجل شبكة بحجم زوجي (10×10)

6- مناقشة النتائج:

وفقاً لسيناريوهات الاختبار المدروسة سابقاً قمنا بحساب مستويات جودة الخدمة المتمثلة بالإنتاجية العالية وزمن التأخير المنخفض المحققة من خوارزميات التوجيه الحتمية والتكيفية بالنسبة للطوبولوجيا FC-Mesh اعتماداً على ثلاثة عوامل هي: عدد العقد الكلي ومعدلات الحقن وأنماط حركة مرور. وقد خلصت نتائج الدراسة إلى أنّ مستوى جودة الخدمة الذي تحققه الخوارزمية المقترحة FCM مع الخوارزميات الحتمية كان أفضل من حيث الإنتاجية وزمن التأخير لكن فقط عند الأحمال الصغيرة للشبكة، بينما أظهرت خوارزمية FCM أداءً عالياً مع الخوارزميات التكيفية كليا عند الأحمال المتوسطة والعالية وبنسب مختلفة تبعاً لحركة المرور المطبقة ولتغير معدل الحقن. فيما حققت خوارزميات التوجيه التكيفية جزئياً قيم متفاوتة وسطية بين القيم التي حققتها الخوارزميات الحتمية والتكيفية كليا. وبالمقارنة مع الدراستين: [K] التي توصلت إلى أن XY ذات الأداء الأفضل عند نمط المرور Hotspot Traffic على طوبولوجيا Mesh، والدراسة [M] التي أثبتت تفوق خوارزميات التوجيه التكيفية (OE) والديناميكية (DyAD) على الخوارزميات الحتمية (YX) و (XY) عند الأحمال الكبيرة على طوبولوجيا Mesh، فإن نتائج هذا البحث توصلت إلى أنّ جودة الخدمة التي حققتها الخوارزمية المقترحة FCM على

طوبولوجيا FC-Mesh كانت تتغير مع تزايد الحمل ومع الخوارزميات المطبقة ضمنها للتوجيه عبر الوصلات الأفقية والرأسية، حيث كانت الخوارزميات الحتمية تلائم الحمل الضعيف، والخوارزميات المتكيفة جزئياً تلائم الحمل المتوسط، أما الخوارزميات المتكيفة كلياً تناسب الأحمال العالية.

7- الاستنتاجات والتوصيات:

يدخل اختيار خوارزمية التوجيه في مقدمة التحديات التي نواجهها عند تصميم أي نظام NoC. من هذا المنطلق اقترحت العديد من الدراسات المرجعية خوارزميات توجيه جديدة وأجرت مقارنات لتقييم فعاليتها ونقاط ضعفها. ولكون معظم الخوارزميات المقدمة تستند إلى الخوارزميات المقترحة ضمن هذا البحث، فقد قمنا في هذه الدراسة ببناء وتصميم خوارزمية توجيه تلائم الطوبولوجيا FC-Mesh، وقمنا باختبار أداء هذه الخوارزمية بالنسبة لبارامترات جودة الخدمة من خلال استدعائها لبعض خوارزميات التوجيه الحتمية والتكيفية. وقد خلصت نتائج هذا البحث إلى أن جودة الخدمة التي حققتها الخوارزمية المقترحة FCM على طوبولوجيا FC-Mesh كانت تتغير مع تزايد الحمل ومع الخوارزميات المطبقة ضمنها، فالخوارزميات الحتمية كانت تلائم الحمل الضعيف، والخوارزميات المتكيفة جزئياً تلائم الحمل المتوسط، أما الخوارزميات المتكيفة كلياً كانت تناسب الأحمال العالية. وعليه يوصي البحث باختيار خوارزمية OE كخوارزمية انتقال عبر الوصلات الأفقية والعمودية ضمن الخوارزمية المقترحة FCM على طوبولوجيا FC-Mesh بالأخص عند الأحمال التي تتجاوز 40% من معدل الحقل على الشبكة مهما اختلف حجم الشبكة أو نمط حركة المرور المطبق. كما يوصي البحث بالتعمق الأكبر في دراسة الخوارزمية المقترحة FCM من حيث قضايا التسامح مع الخطأ والأزدحام، أو من حيث التعديل في منهجية الخوارزمية بحد ذاتها كاعتماد شبكات فرعية أكبر من تلك التي اعتمدها ضمن البحث في تقسيم طوبولوجيا FC-Mesh وتقييم أثر تغيير عدد الشبكات الفرعية على أداء الخوارزمية من حيث جودة الخدمة.

8- المراجع:

- [A]. Wang, J; et al, (Jan, 2025). “Machine Learning System Architecture and Training Method Optimization for Financial Data Center Based on Heterogeneous AI Chips”, Electronic copy available at: <https://ssrn.com/abstract=50823694>.
- [B]. Das, M, (June 2022). “Architecture of Multi-Processor Systems using Networks on Chip (NoC): An Overview”, CVR Journal of Science and Technology, Vol. 22, No.4.
- [C]. Trik, M; Mohammad, A; Ghasemi, F; Pouryeganeh, P, (25 April 2022). “A Hybrid Selection Strategy Based on Traffic Analysis for Improving Performance in Networks on Chip”, Journal of Sensors, Article ID 3112170, 19 pages.
- [D]. Biglari, S; Hosseini, F; Upadhyay, A; Zhao, H, (2024). “Survey of Network-on-Chip (NoC) for Heterogeneous Multicore Systems”, IEEE 17th International Symposium on Embedded Multicore/Many-core Systems-on-Chip (MCSoc).
- [E]. Lit, A; Suhaili, S; Kipli, K; Rajae, N, (Feb 2025). “Performance Analysis of NoC and WiNoC in Multicore System Architectures”, International Journal of Networked and Distributed Computing, 13:13.
- [F]. Bouguettaya, A; et al, (2016). “A New 2D Mesh Routing Approach for Networks on Chip”, UBMA, Rev. Sci. Technol., Synthèse 32: 98 –105.
- [G]. Manzoor, M; Naaz Mir, R; Hakim, M, (2021). “A Review of Design Approaches for Enhancing The Performance of NoCs at Communication Centric Level”, Scalable Computing: Practice and Experience, ISSN 1895–1767, Volume 22, Issues 3, pp. 347–364, SCPE.

- [H]. 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 Association.
- [I]. Trik, M; et.al, (2022). **"A Hybrid Selection Strategy Based on Traffic Analysis for Improving Performance in Networks on Chip"**, Hindawi Journal of Sensors Volume, Article ID 3112170, 19 pages.
- [J]. Tyagi, S; Agarwal, A; Avasthi, V; Maheshwari, P, (2020). **"An automated fault-tolerant route discovery with congestion control using TFRF model for 3D network-on-chips"**, Int. J. Communication Networks and Distributed Systems, Vol. 24, No. 1.
- [K]. Lallas, E, (January 12, 2021). **"An Evaluation of Routing Algorithms in Traffic Engineering and Quality of Service Provision of Network on Chips"**, Scientific Research Publishing Engineering, 13, 1-17.
- [L]. Gangwar, D; Kashyap, A, (August 14, 2024). **"West First Turn Routing Algorithm with Backtracking Mechanism for on Chip Networks"**, ECTI Transactions on Electrical Engineering, Electronics, and Communications.
- [M]. Nejad, M, (September 2020). **"Parametric Evaluation of Routing Algorithms in Network on Chip Architecture"**, International Journal of Computer Systems Science & Engineering, Vol. 35, No. 5.
- [N]. Kalahroudi, P, M; Yaghoubi, E; Barekatin, B, (16 Sep, 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.
- [O]. Mahfoud, A, (2025). **"Design of an Improved Mesh Topology with Integrated Connectivity and Study of its Properties"**, Tartous University Journal for Scientific Research and Studies, Engineering Sciences Series, Vol. 9, No. 5.
- [P]. Ghaffarian, H; Sadeghizadeh, M, (2023). **"Parsim: A Parametric Simulation Application for Wireless Sensor Networks Based on NS2 Simulator"**, Int. J. Nonlinear Anal. Appl. 14 (2023) 1, 2603-2616, ISSN: 2008-6822 (electronic).
- [Q]. Kutuzov, D; et al, (October 2024). **"Simulation of NoC Communication Structures Performance for Self-Similar Traffic"**, IEEE, 2024 8th International Conference on Information, Control, and Communication Technologies (ICCT).
- [R]. Furhad, H; Myon Kim, J, (2015). **"An Extended Diagonal Mesh Topology for Network-on-Chip Architectures"**, International Journal of Multimedia and Ubiquitous Engineering, Vol.10, No.10 (2015), pp.197-210.