

Design a Special Adaptive Router for FC-Mesh Architecture to Reduce Power Consumption at the Chip Level

Adam Mahfoud * 

Dr. Balsam Eid **

Dr. Mohammed Hijazieh ***

Dr. Yaarob Badr****

(Received 5 / 10 / 2025. Accepted 24 / 2 / 2026)

□ ABSTRACT □

Excessive power consumption is one of the most significant problems facing networks on chip (NoC), especially when considering scalability. It is essential to investigate power issues and reduce their consumption during design for all components of the chip architecture, this can be done by making modifications on the components that make up the network, the most prominent of which are perhaps the network routers, given that they are the backbone of the communications infrastructure within the chip. Based on this, our paper proposes an efficient buffer-less router design using an adaptive routing design technique that addresses the connectivity and complexity of the network nodes. The justifications for the design stem from the cost of buffers and their high power consumption, as well as the simplicity of the design. Furthermore, the router design takes into account the uniqueness of each node in terms of its location and complexity, thus minimizing resource consumption in the form of unused ports. The proposed router was implemented on the Full-Connected Mesh (FC-Mesh) architecture. Simulation results for FC-Mesh network architecture, comparing the proposed design method with a non-adaptive buffering approach, showed that the proposed method reduced power consumption by 22.9% to 30.4%, depending on the traffic pattern. Furthermore, it increased data transmission speed, resulting in a throughput increase of up to 11.3% and a latency reduction of up to 9.6% under various network operating conditions.

Keywords: Networks on Chip, Router, Buffer, FC-Mesh, Power Consumption Rate.

Copyright  :Latakia University journal (Formerly Tishreen) -Syria, The authors retain the copyright under a CC BY-NC-SA 04

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

** Associate Professor, Department of Computers and automatic control Engineering, Faculty of mechanical and electrical engineering, Latakia University (Formerly Tishreen), Latakia, Syria.

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

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

تصميم موجه تكيفي خاص بالبنية FC-Mesh لتخفيض الطاقة المستهلكة على مستوى الشريحة

آدم محفوظ * 

د. بلسم عيد **

د. محمد حجازية ***

د. يعرب بدر ****

(تاريخ الإيداع 5 / 10 / 2025. قبل للنشر في 24 / 2 / 2026)

□ ملخص □

يُعدّ الاستهلاك الزائد للطاقة من أهم المشاكل التي تعاني منها الشبكات المدمجة على الشريحة (NoC) Network-on-chip، بالأخص عند النظر إلى موضوع قابلية التوسيع، حيث أنه من الضروري التحقق من مواضيع الطاقة والتقليل من استهلاكها أثناء التصميم بالنسبة لجميع مكونات بنية الشريحة، يمكن ذلك من خلال إجراء تعديلات على الأجزاء الداخلة في تكوين الشبكة، والتي لعل أبرزها أجهزة توجيه الشبكة نظراً لكونها العمود الفقري للبنية التحتية للاتصالات ضمن الشريحة. من هذا المنطلق تقترح ورقتنا البحثية تصميمًا فعالاً لأجهزة التوجيه بدون استخدام مخازن مؤقتة مع تقنية تصميم موجّهات تكيفية التوجيه ومرتبطة باتصالية العقد ضمن الشبكة ودرجة تعقيدها. تأتي مبررات التصميم من التكلفة الناتجة عن المخازن المؤقتة واستهلاكها العالي للطاقة فضلاً عن البساطة في التصميم، وأيضاً مراعاة خصوصية كل عقدة من حيث موقعها ودرجة تعقيدها في تصميم الموجّهات بغية التقليل من استنزاف الموارد المتمثلة بمنافذ غير مستخدمة. تم تطبيق الموجه المقترح على بنية Mesh ذات التوصيل المتكامل (FC-Mesh)، وقد أظهرت نتائج المحاكاة التي أجريت على بنية الشبكة FC-Mesh بمقارنة الطريقة المقترحة في التصميم مع حالة استخدام مخازن مؤقتة وفق توجيه غير تكيفي بأن الطريقة المقترحة ساهمت بتخفيض معدل الطاقة المستهلكة بنسب تراوحت بين 22.9% وحتى 30.4% تبعاً لنمط حركة المرور المطبق، كما كان هناك زيادة بسرعة نقل البيانات من خلال الزيادة المحققة بالإنتاجية بنسب وصلت لـ 11.3%، وتخفيض بزمان التأخير حتى 9.6% عند ظروف تشغيل مختلفة للشبكة.

الكلمات المفتاحية: الشبكات المدمجة على الشريحة، الموجه، مخزن مؤقت، FC-Mesh، معدل استهلاك الطاقة.



حقوق النشر : مجلة جامعة اللاذقية (تشرين سابقاً) - سورية، يحتفظ المؤلفون بحقوق النشر

بموجب الترخيص CC BY-NC-SA 04

* طالب دراسات عليا (دكتوراه) قسم هندسة الحاسبات والتحكم الآلي، كلية الهندسة الميكانيكية والكهربائية، جامعة اللاذقية (تشرين سابقاً)، اللاذقية، سورية. ايميل: adam.y.mahfoud@latakia-univ.edu.sy

** أستاذ مساعد، قسم هندسة الحاسبات والتحكم الآلي، كلية الهندسة الميكانيكية والكهربائية، جامعة اللاذقية (تشرين سابقاً)، اللاذقية، سورية.

*** أستاذ، قسم هندسة الحاسبات والتحكم الآلي، كلية الهندسة الميكانيكية والكهربائية، جامعة اللاذقية (تشرين سابقاً)، اللاذقية، سورية.

**** مدرّس، قسم هندسة الحاسبات والتحكم الآلي، كلية الهندسة الميكانيكية والكهربائية، جامعة اللاذقية (تشرين سابقاً)، اللاذقية، سورية.

مقدمه:

إن التطورات التقنية اليوم تسمح بتنفيذ تطبيقات أكثر تعقيداً على منصات حوسبة باستخدام وحدات معالجة مركزية قوية. كل جيل من المعالجات يتطور عن الجيل الذي سبقه، الأمر الذي يستلزم تحميل منطق إضافي على السيليكون [1]. تحدد جودة الخدمة الأداء العام للأنظمة المتعددة المعالجات -Multi Processors System-on-Chip (MPSoC) من بينها الشبكات المدمجة على الشريحة (NoC) Network-on-Chip، على وجه الخصوص الأداء الذي يراه مستخدمو الشبكة [2]. في مفهوم الشبكات العام ونظم الاتصالات الرقمية وبالأخص فيما يتعلق بمجال الشبكات المدمجة على الشريحة تدخل العديد من القضايا في تحديد معايير قياس جودة الخدمة (QoS) Quality-of-Service أهمها الإنتاجية وزمن التأخير، كما أن معدل استهلاك الطاقة والمساحة المخصصة للشريحة والتسامح مع الخطأ وعرض النطاق الترددي جميعها بارامترات أخذت في الاعتبار لقياس مستويات جودة الخدمة لمثل هذه الأنظمة [3][4][5][6]. يركز البحث على إحدى التقنيات الحديثة المقترحة للتقليل من الطاقة المستهلكة في شبكات NoC، ودراسة أثر هذه التقنيات في تحسين بارامترات جودة الخدمة لهذا النوع من الشبكات.

التقنية المقترحة ضمن هذا البحث في تحسين معدل استهلاك الطاقة تركّز على بنية جهاز التوجيه أو ما يعرف بالموجه router، حيث يُعد جهاز التوجيه أهم عنصر في أنظمة الاتصال المدمجة على الشريحة (NoC) من بين أربعة مكونات رئيسية يتضمنها هذا النوع من الشبكات وهي: العقد، الوصلات، الموجهات والواجهات الشبكية. تتصل مكونات الشريحة بأكملها مع بعضها البعض عبر روابط اتصال، ويقوم جهاز توجيه NoC بإعادة توجيه الحزم الواردة إما إلى نواة الوجهة الحالية أو إلى جهاز التوجيه التالي في مسار التوجيه. يُعطي جهاز التوجيه توجيهاً لحركة الشبكة من المصدر إلى الوجهة. كما أنه يُوازن تدفق البيانات، وهو أمر بالغ الأهمية في شبكات الاتصالات.

أهمية البحث وأهدافه:

نظراً للدور المهم الذي تلعبه أجهزة التوجيه في تصميمات NoC من حيث ضمان اتصال فعال وموثوق بين مختلف مكونات النظام، وتأثيرها الكبير على مستوى الأداء العام للشبكة بالأخص فيما يتعلق بموضوع استهلاك الطاقة، فإننا نسعى في هذه الورقة البحثية إلى تصميم البنية الداخلية لجهاز التوجيه المستخدم في شبكات NoC ثنائية البعد وفق استراتيجية مطورة تقلل من استهلاك الطاقة بالنسبة للشريحة وتلائم التعقيد الحاصل الناتج عن تزايد عدد العقد المدمجة مع بعضها.

بشيء أكثر تفصيلاً سنقوم بتصميم بنية موجه بدون مخازن مؤقتة Buffer-less متكيف التوجيه (يعتمد على خوارزمية توجيه تكيفية) ملائم لبنية الشبكة Mesh ذات التوصيل المتكامل Full-Connected Mesh (FC-Mesh) وذلك بأحجام مختلفة وفق خوارزمية التوجيه التكيفية "فردي-زوجي" Odd-Even (OE)، من خلال الاستغناء عن المخازن المؤقتة في تصميم البنية الداخلية للموجه، مع تقليل عدد المنافذ قدر الإمكان من خلال بناء موجهات على أساس درجة التعقيد والاتصالية لكل عقدة. الغاية من هذا التصميم تقليل استهلاك الطاقة في شبكات NoC القابلة للتوسيع على مستوى الشريحة ككل، دون التأثير سلباً على قيم بارامترات جودة الخدمة.

منهجية البحث:

تستند منهجية البحث إلى تصميم جهاز توجيه وفق عدة مزايا واعتبارات مقسمة على مراحل وهي: تصميم موجه NoC باستخدام مخزن مؤقت واحد على منافذ الدخل، ومتكيف التوجيه يعمل وفق آلية توجيه متكيفة كلياً معتمدة على نموذج الدوران. ثم تخصيص المنافذ لموجهات العقد تبعاً لدرجة تعقيد العقد وموقعها ضمن الشبكة. بالنهاية فإن هذا الموجه سيكون مخصص لملائمة البنية المطورة FC-Mesh التي تعدّ تصميمًا حديثاً ومعدلاً على طوبولوجيا Mesh وتدعم قابلية التوسيع scalability.

مع الإشارة إلى أن تقنية تصميم موجهات العقد في شبكات NoC بدون مخزن مؤقت والتي تسمى Buffer-less هي طريقة مطبقة بعدة دراسات سابقة على شبكة Mesh بالأخص، والمقصود بهذه التقنية ليس الاستغناء التام عن كل المخازن المؤقتة وإنما الاحتفاظ بمخزن مؤقت واحد فقط في كل منفذ دخل، بالمقابل ولتعويض تخزين الحزم يتم تطبيق تقنيات للتحكم بتدفقات الحزم فور وصولها ما يمنع تراكمها.

الدراسات المرجعية:

تعدّ تقنيات بناء الموجه router في الشبكات على الشريحة (NoC) أحد الطرق الواعدة لتقليل استهلاك الطاقة في الأنظمة الرقمية. توفر أجهزة التوجيه NoC بنية تحتية للاتصالات القابلة للتطوير والفعالة التي يمكن أن تساعد في تحسين عمليات نقل البيانات وتقليل استهلاك الطاقة على مستوى الشريحة. توجد العديد من التقنيات والأساليب المستخدمة في تصميم جهاز التوجيه لشبكات NoC لتقليل استهلاك الطاقة، مثل ضبط جهد وتواتر أجهزة التوجيه NoC بشكل ديناميكي على متطلبات عبء العمل، أو استخدام خوارزميات التوجيه الفعالة وآليات التحكم في الازدحام في أجهزة التوجيه NoC لتقليل تصادم البيانات وتقليل عمليات نقل البيانات غير الضرورية، والتي يمكن أن تساعد في خفض استهلاك الطاقة [7]. أيضاً بالإمكان اعتماد تصاميم لموجهات NoC تدعم توفير استهلاك الطاقة، مثل استخدام الترانزستورات المنخفضة التسرب، أو تحسين تخطيط السعة المنخفضة [8]. قدمت العديد من الدراسات المرجعية تقنيات وأساليب لتخفيض الطاقة التي تستهلكها الشريحة، فقد صمم كل من Nachiar و Sumathi [9] بنية توجيه فعالة بدون مخزن مؤقت مع إنشاء حلقة تجاوز محلية داخل العقد، مما يقلل من الانحراف وفقدان الحزم ويحسن الأداء، وقد توصلت الدراسة إلى أنّ التوجيه بدون مخزن مؤقت يقلل من تبديد الطاقة دون المساس بالأداء. اعتمد Nagaraju وآخرون [10] تنفيذ مخازن مؤقتة مرنة مُحكمة بواسطة تقنية Finite State Machine (FSM) والتي تمثل نظام تحكم مطور لتنظيم تدفق البيانات واكتشاف التدفقات الزائدة أو الناقصة مما يضمن استكشاف حركة المرور بشكل لحظي لعمليات التوجيه ويستعيز عن تخزين الحزم، وقد أثبتت نتائج الدراسة أن جهاز التوجيه الذي تم تصميمه يُقدّم أداءً مُحسّناً وكفاءةً في استخدام الطاقة مقارنةً بنموذج NoC التقليدي القائم على آلية التخزين المعتمدة على تقنية "الداخل أولاً يخرج أولاً" First-input-First-output (FIFO). اقترح Parepalli وآخرون [11] تصميمًا جديدًا لجهاز توجيه NoC بدون مخزن مؤقت لبنية شبكة Mesh ثنائية الأبعاد 4×4، من خلال الاستغناء عن مفاتيح التبديل crossbar ومخازن الإدخال والإخراج من بنية جهاز التوجيه المقترحة. الموجه المقترح يعتمد نظام الأولويات الديناميكي مع تطبيق توجيه حتمي وفق خوارزمية XY الحتمية. أظهرت نتائج الاختبار فعالية البنية المقترحة من حيث كفاءة الطاقة بنسب تجاوزت 41%. في دراسة أخرى مشابهة للدراسة السابقة قام بها كل من Patil و Sandi [12] اعتمدوا تصميمًا لبنية NoC مطورة غير متزامنة ثنائية الأبعاد 4×4 من نوع Mesh مصممة

وفق جهاز توجيه جديد باستخدام خوارزمية توجيه غير تكيفية (اعتمدوا خوارزمية XY الحتمية) من خلال الاستغناء عن مخازن الإدخال والإخراج التقليدية والمفتاح التصالبي crossbar، تم دمج مُشغّر الأولوية وجهاز التحكم Arbiter القائم على تقنية FSM، هذا أدى لتقليل استهلاك الطاقة حتى (0.56 واط). قام كل من Majeed و Mahdi و Kadhim [13] بتنفيذ شبكة Mesh ثنائية الأبعاد لـ 16 عقدة باستخدام جهاز توجيه جديد مقترح لحل مشكلة تعارض الحزم بغية التقليل من استهلاك الطاقة وتخفيض زمن التأخير. تم بناء جهاز التوجيه في هذه الشبكة بدون مخازن مؤقتة لمتناهي الدخل مع جدول زمني بأولوية ثابتة، مما يؤدي إلى تدفق البيانات دون أي تعارض بين الحزم. تم تنفيذ هذا الموجه واختباره، حيث تبين أن البنية المصممة ساهمت بتوفير موارد الشبكة، فقد بلغ الحد الأقصى للتردد حوالي 102.093 ميغاهرتز، وإجمالي الطاقة المستهلكة حوالي 150 مللي واط للشبكة فقط. اقترحت الدراسة [14] تصميم موجه يجمع بين التوجيه المُخزّن مؤقتاً وغير المُخزّن مؤقتاً للاستفادة من مكاسب إضافية في الأداء والمساحة. بينت النتائج التجريبية أن جهاز التوجيه المصمم يحقق ترددات ساعة أعلى ومساحة أقل مقارنةً بأجهزة توجيه المخازن المؤقتة، مع تحقيق مكاسب عالية في الطاقة. قدّمت الدراسة [15] تصميمًا جديدًا لموجه يعمل وفق تقنية معدل البيانات المضاعف (Dual DataRate (DDR) على شريحة FastTrack. الغاية من هذا الموجه تقليل استهلاك الطاقة وزمن التأخير عن طريق تجاوز تبديل مرحلة العبور ضمن المخزن المؤقت، من خلال إضافة مسار سريع بين رأس المخزن المؤقت للقناة الافتراضية عند كل منفذ دخل و رابط عند الخرج المقابل. وقد خلصت الدراسة إلى أن بنية الموجه المصمم ساهمت بتوفير معدل الطاقة المستهلكة بنسبة 5%.

طرائق البحث ومواده:

تُستخدم المخازن المؤقتة ضمن موجهات شبكات الـ NoC كشكل من أشكال تخزين حزم البيانات التي تنتظر الموارد المطلوبة حتى يتم طلبها. عند استخدام المخازن المؤقتة كتخزين في أجهزة التوجيه قد يؤدي ذلك لاستنزاف الطاقة وتوقفها، أو انخفاض معدل نقل البيانات، أو قفل التشغيل [16]. يمكن تقليل استهلاك الطاقة في شبكات NoC على مستويات مختلفة بالنسبة للشريحة ككل أو على مستوى مكوناتها بشكل مستقل. ولكن عادةً ما تُجرى على مستوى بنية الموجهات (أجهزة التوجيه) نظراً لاستهلاكها طاقة أكبر مقارنةً بباقي المكونات الأخرى من الشبكة [17].

1. استهلاك الطاقة في موجهات الـ NoC:

على الرغم من المزايا الفائقة التي تنفرد بها الشبكات المدمجة على الشريحة NoC، إلا أنّ أجهزة التوجيه لهذه النوع من الشبكات تُعدّ مصدراً هاماً لاستهلاك الطاقة في الأنظمة متعددة الأنوية. فمع ازدياد عدد العقد ضمن الشريحة يزداد تعقيد نقل البيانات، مما يؤدي لزيادة الطلب على الطاقة. ينشأ استهلاك الطاقة في أجهزة التوجيه من عوامل مختلفة [18]، بما في ذلك مرور حزم البيانات عبر المخازن المؤقتة والمفاتيح التصالبية crossbar، بالإضافة إلى الطاقة الديناميكية وطاقة التسرب المرتبطة بالمكونات النشطة. ونظراً لارتفاع تكاليف الطاقة والمخاوف البيئية، أصبح تحسين كفاءة استخدام الطاقة في أجهزة توجيه NoC تحدياً ملحاً. إن القدرة على تحسين استهلاك الطاقة لا تُعزز استدامة أنظمة الحوسبة فحسب، بل تُحسن الأداء العام من خلال تقليل المشاكل الحرارية وميزانيات الطاقة [19]. يمكن تصنيف استهلاك الطاقة في موجهات الشبكات على الشريحة NoC إلى طاقة

ديناميكية وطاقة ساكنة، حيث يُسهم كلٌّ منهما في إجمالي استهلاك الطاقة لجهاز التوجيه. تُستهلك الطاقة الديناميكية أثناء عمليات التبديل بين مكونات جهاز التوجيه خلال معالجة حزم البيانات وتوجيهها. أما الطاقة الساكنة فتستهلكها المكونات غير الفعالة في جهاز التوجيه. تشمل عوامل استهلاك الطاقة الديناميكية في موجّهات الشبكات على الشريحة ما يلي [20]:

1. المخازن المؤقتة: حيث تُخزّن المخازن المؤقتة الحزم لفترة زمنية مؤقتة أثناء انتظار معالجتها أو توجيهها. يمكن أن تكون الطاقة المستخدمة في القراءة من المخازن المؤقتة والكتابة إليها كبيرة، خاصةً عند الأحمال العالية.
 2. المفاتيح التصالبيه: تُعدّ أحد المكونات الرئيسية التي تُسهّل توجيه الحزم من منافذ الدخل إلى منافذ الخرج. تكون الطاقة المستهلكة في تبديل المسارات عبر مفاتيح التبديل التصالبيه كبيرة، خاصةً مع زيادة عدد قنوات الدخل والخرج.
 3. الوصلات البينية: تُساهم وصلات الاتصال بين مكونات جهاز التوجيه في استهلاك الطاقة الديناميكي بسبب خسائر المقاومة والسعة المرتبطة بإرسال الإشارات.
 4. الطاقة الساكنة أو الطاقة المتسربة: وهي الطاقة التي تستهلكها المكونات غير النشطة في جهاز التوجيه.
- بالعموم يُعرّف مقياس استهلاك الطاقة (E_{bit}) عبر شرائح NoC بأنه كمية الطاقة المستهلكة لنقل بت واحد من البيانات عبر أجهزة التوجيه. ويمكن حساب قيمته باستخدام المعادلة (1):

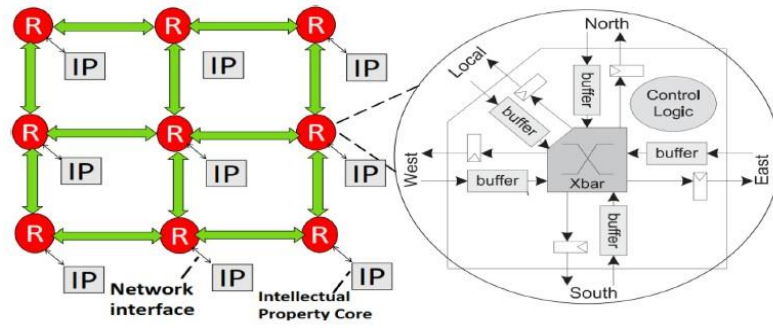
$$E_{bit} = E_{routers} + E_{Links} \quad (1)$$

حيث تمثل كل من $E_{routers}$ و E_{Links} الطاقة المستهلكة في عمليات التبديل والأحمال الكهربائية المرتبطة بالوصلات والموجهات على التوالي.

2. البنية الداخلية لموجهات الـ NoC:

أجهزة التوجيه (الموجهات) ضمن شبكات NoC هي أجهزة ذكية تستقبل الحزم الواردة، وتفحص وجهتها، وتبحث عن أفضل مسار لنقل الحزم من عقدة المصدر إلى عقدة الوجهة. يقرأ جهاز التوجيه المعلومات التي توفرها الرسالة الواردة بناءً على وظيفة التوجيه ووجهة الحزمة. يتكون الموجه من خمسة منافذ أساسية هي: الشرقي والغربي والشمالي والجنوبي والمحلي، حيث تُستخدم المنافذ الأربعة الأولى للاتصال بأجهزة توجيه أخرى، بينما يُستخدم المنفذ المحلي local للتوصيل مع نواة العقدة المحلية. يعدّ جهاز التوجيه (الموجه) بمثابة مُبدّل ضمن أي شبكة NoC، وهو جزءٌ بالغ الأهمية من الشبكة المُدمجة من بين أربعة مكونات أساسية تتضمنها أي شبكة NoC، وهي العقد والوصلات والموجهات والواجهات الشبكية. بالعموم ينبغي على المُصمم مراعاة بساطة جهاز التوجيه وتصميمه على هذا النحو لتجنب استنزاف في التكلفة والمساحة والطاقة.

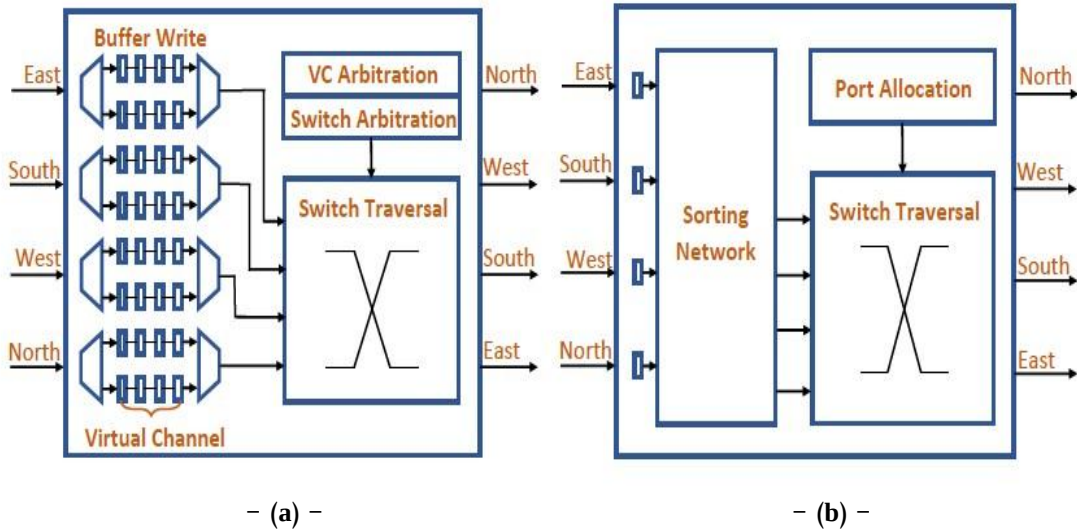
يحتوي كل منفذ في جهاز التوجيه على قناة إدخال وقناة إخراج. تنتقل حزم البيانات إلى قناة إدخال منفذ جهاز التوجيه، ومن ثم إلى قناة إخراج المنفذ الآخر. تتضمن كل قناة من قناتي الإدخال والإخراج منطق فك تشفير خاص بها، مما يُحسن أداء جهاز التوجيه [21]. تعمل المخازن المؤقتة كخزين مؤقت للبيانات، حيث تُخزّن البيانات ويُعاد توجيهها. يظهر الشكل (1) بالتكبير بنية الموجه والمنافذ الخمسة الرئيسية له.



الشكل (1) - بنية الموجه والمنافذ الخمسة الرئيسية ضمن شبكة NoC ثنائية البعد

يتم الحصول على الحزمة بأكملها وتخزينها في وحدات تحكم جهاز التوجيه قبل توجيهها للعقدة التالية [22]، فوحدات التحكم هي رتل يعمل وفق آلية FIFO. يُعدّ الطريقة الأكثر اعتماداً وبساطة للتنفيذ من خلال تخزين الحزم الواردة في رتل واحد، حيث تُخزن حزمة الإدخال الأولى في رأس الرتل، وتُخزن الثانية في المكان الثاني حتى تُخزن الحزمة الأخيرة في ذيل المخزن المؤقت.

تنتقل الموجهات الحزم الواردة من منافذ الإدخال إلى منافذ الإخراج ضمن أي شبكة NoC، وتختلف هذه الموجهات عن بعضها من حيث استهلاكها للطاقة ومساحة التخزين. عندما يحتوي جهاز توجيه NoC النموذجي (buffered) على عدد قليل فقط من المخازن المؤقتة، عندها تسمى شبكات NoC بالشبكات المخزنة مؤقتاً (buffered NoCs)، بينما التي تحتوي على سجل واحد فقط تسمى بالشبكات الغير مخزنة مؤقتاً (buffer-less NoCs) أي بدون مخزن مؤقت [23]. يبين الشكل (2) البنية الداخلية لموجه مع/بدون مخزن مؤقت، وفيما يلي شرح لكل من هذين النوعين:



الشكل (2) - بنية جهاز التوجيه (a: مع مخزن مؤقت Buffered، b: بدون مخزن مؤقت Bufferless) [9]

2-1 شبكات NoC مع مخزن مؤقت Buffered NoCs:

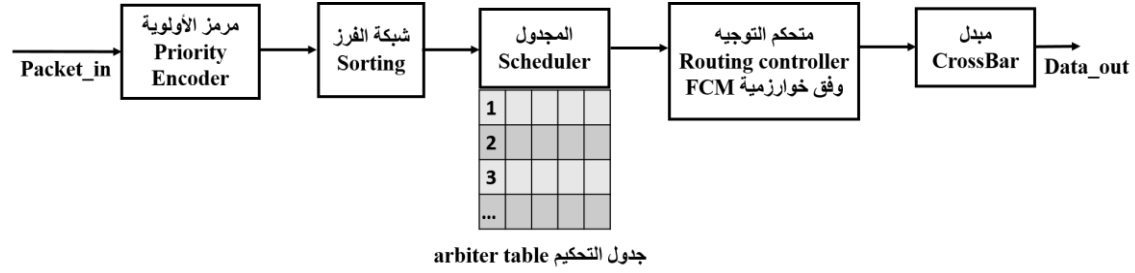
في هذا النوع من شبكات NoC تتضمن البنية الداخلية لجهاز التوجيه من مخزن مؤقت عام، حيث تُخزن البيانات الواردة أولاً في مخازن الإدخال، والتي عادةً ما تُقسم إلى قنوات افتراضية متعددة (VCs) virtual channels لتأمين سرعة النقل وتحقيق جودة الخدمة، بالإضافة إلى تجنب حجب رأس الخط وتلافي حصول حالات الجمود. توجد وحدة تحكم رأس الخط (VC Arbitration)، ومهمتها تحديد البيانات الراكبة من بين جميع البيانات التي تطلب نفس بيانات الخرج، وأيضاً وحدة لحساب المسار مهمتها تحديد الاتجاه المطلوب للحزمة. توجد أيضاً وحدة تحكم التبديل (SA) Switch Arbitration التي تقوم بالتحكيم بين جميع البيانات التي تصل إلى منفذ الإدخال نفسه في جهاز التوجيه. بالعموم يجب تصميم المحكم بحيث يضمن عدم نقصان البيانات أو قفل التشغيل، ويجب أن يضمن جدولة سريعة وخالية من التنافس.

2-2 شبكات NoC بدون مخزن مؤقت Bufferless NoCs:

نظراً لأن المخازن المؤقتة تشغل مساحة كبيرة من الشريحة وتستهلك جزءاً كبيراً من طاقة الشبكة، فإن نظام NoC من نوع Bufferless (بدون مخزن مؤقت) يحتفظ بمخزن مؤقت واحد فقط في كل خط خاص بمنفذ دخل، كل منها قادر على استيعاب ملف تعريف واحد. تُنقل الملفات التعريفية عبر الشبكة بشكل مستقل. يحتاج كل ملف تعريف إلى حمل رأس يحتوي على معلومات التوجيه، ويُرسَل عبر روابط مخصصة. يجب أن تتحرك جميع الملفات التعريفية للأمام عبر خطوط منافذ الدخل، ثم تُرسل إلى بعض منافذ الخرج بنهاية كل دورة. ضمن كل جهاز توجيه تمر جميع الملفات التعريفية الواردة أولاً عبر شبكة فرز لتحديد ترتيبها، بعد ذلك يُجرى تخصيص المنفذ بالتتابع للملفات التعريفية بترتيب تنازلي. عندما تطلب عدة نبضات نفس منفذ الإخراج، يُمنح نبض واحد فقط حسب نظام الأولوية (عادةً يكون ذو أولوية قصوى). يتم توجيه النبضات المتنافسة المتبقية إلى المنافذ غير المطالب بها [24].

3. الموجه المقترح:

إن إضافة أي جهاز توجيه أو وصلة إضافية إلى طوبولوجيا الشبكة يؤدي إلى تكلفة إضافية من حيث العتاد الصلب والطاقة اللازمة لنقل البيانات وتوجيهها، لذا يعد اختيار أو تصميم طوبولوجيا NoC تعمل من مبدأ عدم تفعيل العقد أو الوصلات عند عدم الحاجة إليها مع الحفاظ على الأداء الجيد والمطلوب أحد أكثر الجوانب تحدياً [25]. يتضمن تصميم جهاز توجيه في نظام NoC اعتبارات عديدة أهمها: طوبولوجيا الشبكة وخوارزميات التوجيه وآليات التحكم في التدفق ومتطلبات جودة الخدمة [26]. على العموم فإن الموجه المقترح سيتم تصميمه لملاءمة الطوبولوجيا FC-Mesh مع تطبيق خوارزمية توجيه تكيفية Odd-Even (OE) ضمن ثلاثة أنماط مختلفة لحركة المرور وسيتم دراسة كمية الطاقة التي تستهلكها الشريحة المصممة وفقاً للبنية FC-Mesh. تتضمن البنية الداخلية لجهاز التوجيه المقترح تطبيقه على البنية FC-Mesh خمسة مراحل وفق ما تمّ اعتمادها في الدراسة [12] لكن مع اعتبارات جديدة وهي تخصيص منافذ موجه كل عقدة تبعاً لدرجة تعقيدها، ومع تطبيق خوارزمية توجيه OE التكيفية. إن هذه المراحل يتم تنفيذها على التتابع وبشكل تسلسلي، أي إن خرج كل مرحلة هو دخل للمرحلة التي تليها، وهي: ممرز الأولوية، شبكة فرز الحزم، المُحكم (المُجدول)، وحدة التوجيه (متحكم التوجيه)، المبدل التصالبي (المفتاح التصالبي) crossbar. يوضح الشكل (3) البنية الداخلية لجهاز التوجيه المقترحة المكونة من خمس مراحل.



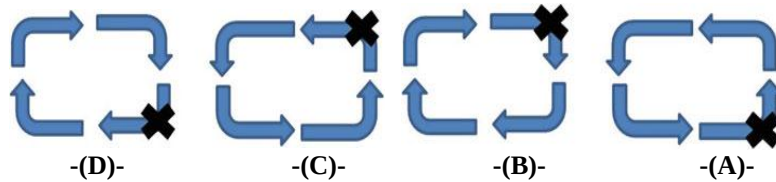
الشكل (3) - البنية الداخلية للموجه المقترح

تمرّ الحزم المنقولة بداية عبر مرّز الأولوية حيث يتم توجيهها عبر الشبكة بطريقتين: إما التوجيه للحزم ذات الأولوية الأعلى عبر روابط ذات أولوية عالية، أو يتم توجيهها برمجياً باستخدام التحكم في التدفق القائم على الانتماء Credit-based flow control (وهو آلية تضمن توجيه الحزم من خلال تعقب حالة المرور ضمن الشبكة بشكل دوري عن طريق تقنية FSM والذي مهمته اكتشاف حالة حركة المرور بشكل دوري وتوافر المنافذ في مسار الوجهة)، وهي الطريقة المعتمدة بتصميمنا. في المرحلة التالية تمر الحزم عبر شبكة فرز متوازية حيث تُجرى عمليات المقارنة والتبادل، ويتم الفرز بحيث تخصص الأولوية الأعلى للقناة العليا. يتم فيها ترتيب النبضات حسب الأولوية، من خلال إعطاء النبضات الواردة من منافذ الدخل (الغرب والشرق والجنوب والشمال والمركزي والمحلي) أولويات محددة ويتم ترتيب هذه الأولويات عبر المجدول. يغير المجدول أولوية المنفذ بشكل ديناميكي، فإذا كانت المدخلات من كل منفذ موجهة إلى منافذ مختلفة، فسيتم إرسال الحزمة بشكل طبيعي إلى منفذ الخرج المقابل دون أي مشكلة، ولكن إذا طلب أكثر من منفذ دخل أن يرسل حزمة البيانات إلى منفذ الوجهة نفسه، عندها سيتحقق أولاً من أولويات المنفذ ويبدأ بالمنفذ ذي الأولوية الأعلى (كما هو مُعيّن من قبل مرّز الأولوية) حيث تكون الأولوية القصوى للمنفذ المحلي المتصل بالعقدة التي يرمز لها عادة (IP). بعد كل عملية نقل يُعطى الطلب المُقدّم أولوية أقل بجولة التحكم التالية.

يتم تحديد خوارزمية التوجيه المتبعة ضمن وحدة التحكم بالتوجيه (متحكم التوجيه)، حيث يوجد العديد من أنواع خوارزميات التوجيه والتي يمكن تصنيفها ضمن ثلاثة أصناف: حتمية (مثل XY)، متكيفة جزئياً (مثل WF, NL, NF)، متكيفة بشكل كامل (مثل OE). في الموجه المصمم سيتم اختيار خوارزمية توجيه "فردي-زوجي" التكيفية OE (Odd-Even) كخوارزمية توجيه ضمن متحكم التوجيه، وذلك بناءً على دراسة معدة مسبقاً من قبلنا أظهرت ملائمة خوارزمية OE للبنية FC-Mesh [27]. تعدّ خوارزمية OE خوارزمية توجيه تكيفية تعتمد على نموذج الدوران Turn Model القائم على مبدأ التكيف الموزع، ومطبقة في العديد من شبكات NoC [28]. ولكون هذه الخوارزمية تقدّم العديد من قيود الانتقال فهي خالية من الجمود Deadlock. يتم في هذه الخوارزمية حساب أكثر من مسار توجيه بين المصدر والهدف والخيار يقع على مسار واحد تبعاً لشروط وقيود الازدحام بالشبكة، وتتغير هذه المسارات وفقاً للتغيير الديناميكي لحالة ازدحام الشبكة. كل عقدة في طوبولوجيا الشبكة Mesh ثنائية الأبعاد يتم تمثيلها حسب موقعها ضمن أسطر وأعمدة الشبكة بالإحداثيات (x,y)، ووفقاً لهذه الخوارزمية يعدّ العمود ضمن الشبكة عمود زوجي إذا كان البعد x للعقدة رقم زوجي even وبحال كانت قيمة x فردية فيعدّ حينها العمود فردي odd. يعرف الدوران Turn على أنه تغيير لاتجاه الانتقال بمقدار 90 درجة، وعلى أساس ذلك يكون هناك ثمانية احتمالات للاتقافات (الدورات) عند كل انتقال. الانتقال ES يعرف على أنه انتقال Turn فقط عندما يكون التغيير في الاتجاه من الشرق إلى الجنوب بمقدار 90 درجة، والانتقال WS يعرف على أنه انتقال Turn فقط عندما يكون

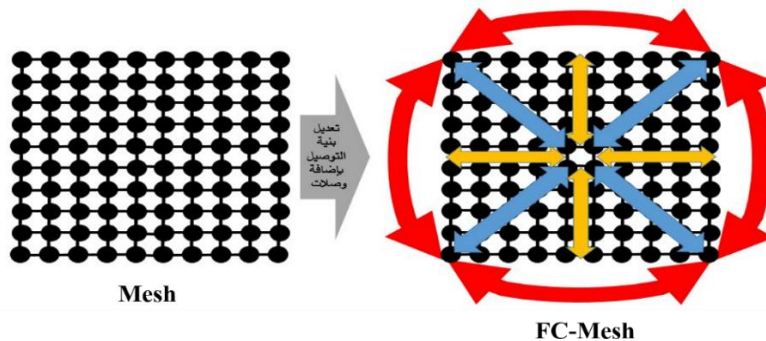
التغيير في الاتجاه من الغرب إلى الجنوب بمقدار 90 درجة، وبنفس الأمر تعرف بقية الانتقالات الستة المتبقية NE, NW, SE, SW, WN, EN [29]. تتلخص خوارزمية التوجيه OE وفق النظريتين الآتيتين:

- نظرية 1: بحال كانت العقدة موجودة في عمود زوجي فلا يمكن للرسالة أن تقوم بالانتقال "شرق-شمال" EN، وإذا كانت العقدة موجودة في عمود فردي فلا يمكن للرسالة أن تقوم بالانتقال "شمال-غرب" NW، كما يوضحه الشكل (4) في الحالتين A و C.
- نظرية 2: إذا كانت العقدة موجودة في عمود زوجي فلا يمكن للرسالة أن تقوم بالانتقال "شرق-جنوب" ES، وإذا كانت العقدة موجودة في عمود فردي فلا يمكن للرسالة أن تقوم بالانتقال "جنوب-غرب" SW، كما يوضحه الشكل (4) في الحالتين B و D.



الشكل (4) - الانتقالات الممكنة للأعمدة الزوجية والفردية في خوارزمية Odd Even (OE) [28]

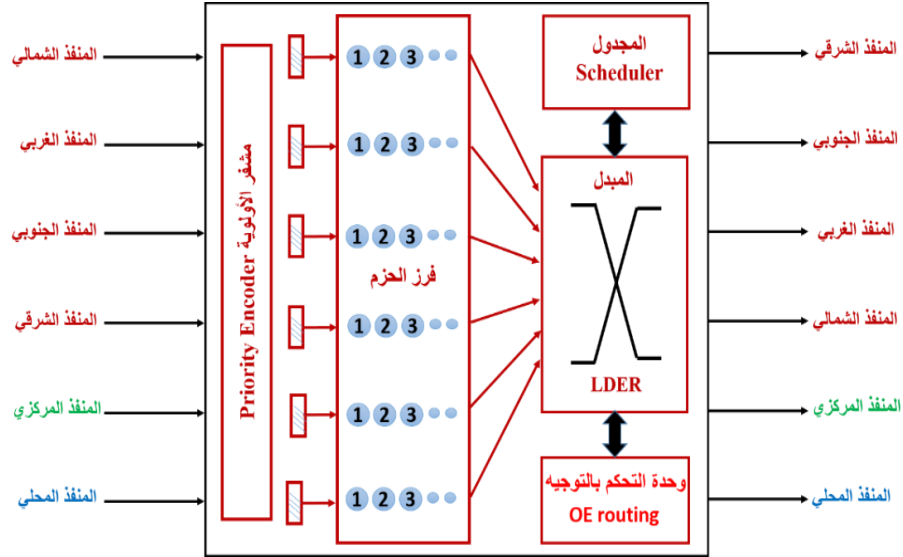
في النهاية يتم إرسال الحزم إلى وحدة فك ترميز LEDR عبر المبدل التصالبي Switch CrossBar بعد إزالة معلومات الرأس. سنقوم على جعل التصميم غير متزامن باستخدام ترميز LEDR ثنائي الطور بدون عودة إلى الصفر، بالنهاية سيتم دمج هذا الترميز مع الموجه. كما ذكرنا أن الموجه المصمم مخصص لملاءمة البنية المطورة FC-Mesh [30] ذات التوصيل المتكامل. تعد البنية FC-Mesh من الشبكات الأكثر ملائمة لقابلية التوسيع، وتعد تصميمها معدلاً على طوبولوجيا Mesh بإضافة عدد محدد وثابت من الوصلات القطرية والوصلات الملتفة الإضافية والتي يكون عددها (12-16) وصلة مثلما هو موضح بالشكل (5).



الشكل (5) - التعديل على بنية توصيل Mesh للوصول إلى البنية FC-Mesh

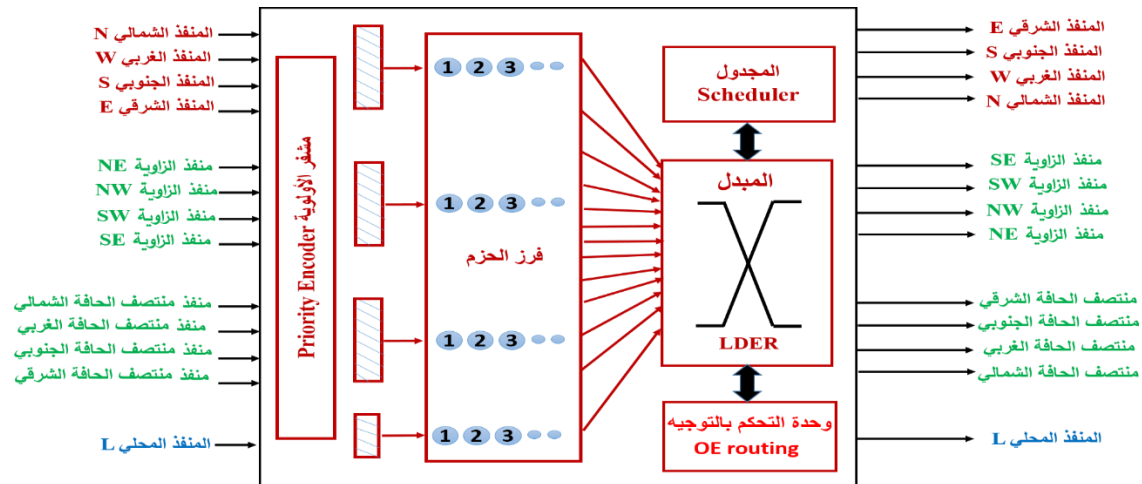
نقاس درجة تعقيد العقدة degree (deg) بعدد منافذ الاتصال المتصلة بالعقدة (الداخلية والخارجية من وإلى العقدة) وهي تحدد درجة الاتصالية ضمن الشبكة [31]، ويفضل أن تكون بقيمة ثابتة مهما زاد حجم الشبكة. بالنسبة لدرجة التعقيد في البنية FC-Mesh فإن غالبية العقد درجة تعقيد تتراوح بين 3 و 5 تبعاً لموقع العقدة ضمن الشبكة، حيث تكون درجة التعقيد 5 بالنسبة للعقد بالزوايا الأربعة، و 4 بالنسبة للعقد الداخلية وفي منتصف الحواف على محيط الشبكة، بينما تكون 3 لبقيّة العقد الواقعة على محيط الشبكة باستثناء منتصف الحواف، وتكون درجة التعقيد

الأكبر هي فقط عند العقد المركزية، حيث تكون 7 من أجل الشبكة ذات الحجم الزوجي، و 12 من أجل الشبكة ذات الحجم الفردي. لهذا السبب ونتيجة للفرق الكبير بدرجة الاتصالية المحققة تبعاً لموقع العقدة فإنه سيتعين علينا تصميم موجه خاص بالعقد المركزية وعقد الزوايا على وجه الخصوص، بينما تكون البنية الداخلية لباقي موجهات العقد الأخرى ضمن الشبكة هي نفسها. سنقترح تخصيص منفذ خاص للاتصال بموجه العقدة المركزية هذا المنفذ يكون فعال بالنسبة للعقد المتصلة مع العقد (5) المركزية فقط. يبين الشكل (6) الموجه الافتراضي الخاص لأي عقدة ضمن الشبكة باستثناء موجه العقد (5) المركزية وموجه العقد بالزوايا.



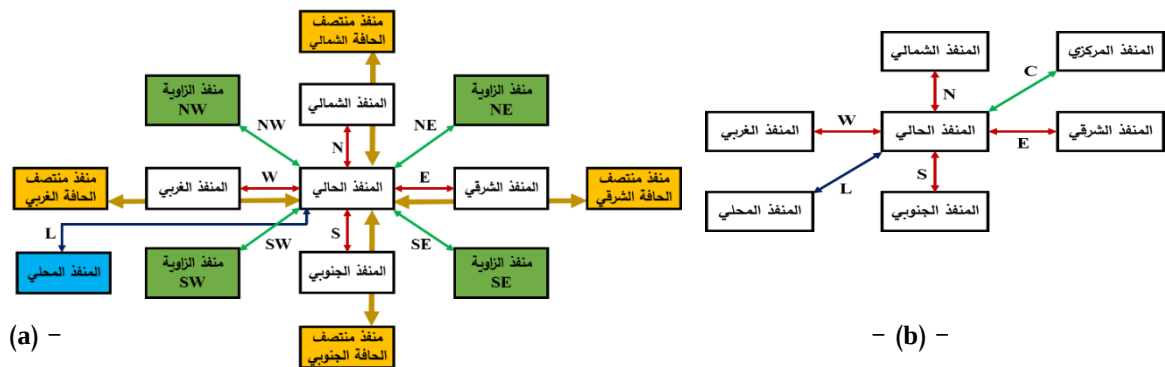
الشكل (6) - الموجه الافتراضي الخاص لأي عقدة باستثناء موجه العقد (5) المركزية (حسب نوع الشبكة) وموجه العقد بالزوايا

يتضمن هذا الموجه المنافذ الأربعة الافتراضية الموجودة في موجهات الشبكة Mesh ومنفذ محلي ومنفذ سادس خاص للتوصيل مع العقدة المركزية حيث يكون هذا المنفذ فعال فقط عند العقد في الزوايا الأربعة وفي منتصف حواف الشبكة والتي لها اتصال مع العقد (5) المركزية بشكل مباشر. أما الموجه الخاص بعقد الزوايا فيكون مماثل للموجه الافتراضي تماماً، لكن مع زيادة منفذين إضافيين للتوصيل مع العقد بالزوايا المجاورة، حيث أن عقد الزوايا ضمن البنية FC-Mesh تنفرد بوصلات الحافة الطويلة التي تصلها ببعضها من خلال وصلتين إضافيتين تتفرعان من كل عقدة. بالتالي سيتم تخصيص منفذين إضافيين (7 و 8) مستقلين عن المنافذ الستة الخاصة بالموجه الافتراضي للشبكة FC-Mesh. يبين الشكل (7) الموجه الخاص بالعقدة المركزية والذي يتضمن 12 منفذ، مع منفذ محلي local للاتصال بالعقدة المركزية نفسها.



الشكل (7) - الموجه الخاص بالعقدة المركزية متضمناً 13 منفذ

باختصار إنّ تصميم الموجه الملائم للبنية المدروسة FC-Mesh يأخذ ثلاث حالات: الحالة الأولى بحال كان موجه العقد (ة) المركزية، والحالة الثانية إذا كان موجه لعقدة من عقد الزوايا الأربعة، والحالة الثالثة وهي حالة عامة تمثل موجه أي عقدة من العقد الأخرى المتبقية بالشبكة. الغاية من هذا التصميم المتفرد وخلافاً للدراسات السابقة التي تقوم بتصميم موجه عام يطبق على أي عقدة من عقد الشبكة المدروسة يأتي من مبررين اثنين: الأول هو الخصوصية التصميمية والطوبولوجية التي تتمتع بها البنية FC-Mesh من حيث توزع الوصلات الإضافية بين العقد وتنوعها، حيث توجد وصلات قطرية ووصلات حافة طويلة، ومن جهة ثانية بسبب الفارق الكبير بدرجة التعقيد بين عقد الشبكة والذي يترجم إلى فوارق كبيرة بعدد المنافذ الخاصة بموجهات العقد ضمن الشبكة. المبرر الثاني هو بغية تجنب تصميم موجه موحد لكل العقد بالتالي تجنب تخصيص عدد كبير من المنافذ الغير مستخدمة بالنسبة إلى العدد الكبير من العقد على مستوى الشبكة، وانطلاقاً من مبدأ ضرورة التصميم مع الأخذ بالاعتبار عدم تفعيل العقد أو الوصلات عند عدم الحاجة إليها. هذه الآلية بالتصميم ستساهم بتأثير إيجابي على الأداء النهائي للشبكة وتقلل من الطاقة المستهلكة جنباً إلى جنب مع منهجية تصميم الموجه المقترحة بتقليل استخدام المخازن المؤقتة Buffer-less. يبين الشكل (8) تخصيص المنافذ لموجهات العقد (ة) المركزية (حسب نوع الشبكة) وبقية العقد ضمن البنية FC-Mesh.



الشكل (8) - منافذ الموجه المصمم تبعاً لموقع العقدة :a) موجه العقدة المركزية ، b: موجه باقي العقد عدا المركزية وعقد الزوايا

4. الدراسة العملية:

سنقوم في هذا القسم بإجراء محاكاة للشبكة FC-Mesh يتم من خلالها مقارنة تجريبية لأداء الموجه المقترح للبنية FC-Mesh بحالتين: الحالة الأولى (المقترحة) "buffer-less" بدون استخدام مخازن مؤقتة مع تطبيق خوارزمية توجيه تكيفية OE وتخصيص منافذ الموجهات بناءً على درجة تعقيد كل عقدة (تبعاً لاتصالية العقدة)، والحالة الثانية "buffered" تتضمن استخدام مخازن مؤقتة على منافذ خطوط الدخول لموجهات العقد وفق خوارزمية توجيه XY الحتمية. الغاية دراسة تأثير الآليات المقترحة في التصميم على معدلات استهلاك الطاقة، وعلى بارامترات الإنتاجية وزمن التأخير كون هذه البارامترات تدخل في معايير تقييم جودة الخدمة لأي شبكة كما ذكرنا في مقدمة البحث. ستنتم الدراسة من أجل حجم الشبكة 9×9 (81 عقدة) ومن أجل أنماط مختلفة لحركة المرور (حركة المرور الموحدة العشوائية random - انعكاس البت Bit Reversal - تبديل البت Shuffle Bit)، وتحت معدلات حمل مختلفة للشبكة (20, 50, 80, 100) %، حيث تم اختيار هذه القيم لتكافئ الحمل الضعيف والمتوسط والكامل. سنقوم بإجراء المحاكاة ضمن بيئة تشغيل Ubuntu 22.04 باستخدام المحاكى ORION 2.0 لتقييم استهلاك الطاقة ودراسة بارامترات الإنتاجية وزمن التأخير. يعدّ محاكي ORION 2.0 أداة قوية لاختبار أداء شبكات NoC ودراسة أدائها [32]. يبين الجدول (1) قيم البارامترات المدخلة للمحاكي.

الجدول (1) - قيم البارامترات المدخلة للمحاكي

Network size حجم الشبكة	9×9
Parameters البارامترات المدروسة	استهلاك الطاقة - الإنتاجية - زمن التأخير
Traffic Pattern نمط حركة المرور	حركة المرور العشوائية الموحدة random - انعكاس البت Bit Reversal - تبديل البت Shuffle Bit
injection rate معدل الحمل المطبق	(20,50,80,100)%
Packet size طول الحزمة	10 flit
Clock frequency تردد الساعة	2GHz
Simulation time زمن المحاكاة	2000 clock cycles
router's frequency تردد جهاز التوجيه	900 MHz

أظهرت النتائج التجريبية في اختبار الموجه المقترح والمنفذ على البنية FC-Mesh وفقاً لقيم المحاكاة المحددة بالجدول (1) السابق قيم الطاقة المستهلكة (بالميلي واط mw) والإنتاجية (ميغا بت بالثانية Mbps) وزمن التأخير (بالميلي ثانية ms) للبنية FC-Mesh بحجم 9×9 تحسناً جيداً وملحوظاً من حيث معدل الطاقة المستهلكة مقارنةً بباقي البارامترات المدروسة وهي الإنتاجية وزمن التأخير، والتي حققت تحسناً أيضاً لكن بمعدلات أقل نوعاً ما. فيما يلي سنقدم تحليلاً للنتائج التي تم الوصول إليها.

يلخص الجدول (2) النتائج التي حصلنا عليها من حيث الطاقة المستهلكة والإنتاجية وزمن التأخير للبنية المدروسة FC-Mesh بحجم 9×9 وتحت أنماط مختلفة لحركة المرور وضمن أحمال متغيرة بالحالتين buffered و buffer-less، حيث قمنا بتجميع النتائج بجدول واحد للإيضاح وسهولة المقارنة من حيث تغير الأحمال وأنماط حركة المرور.

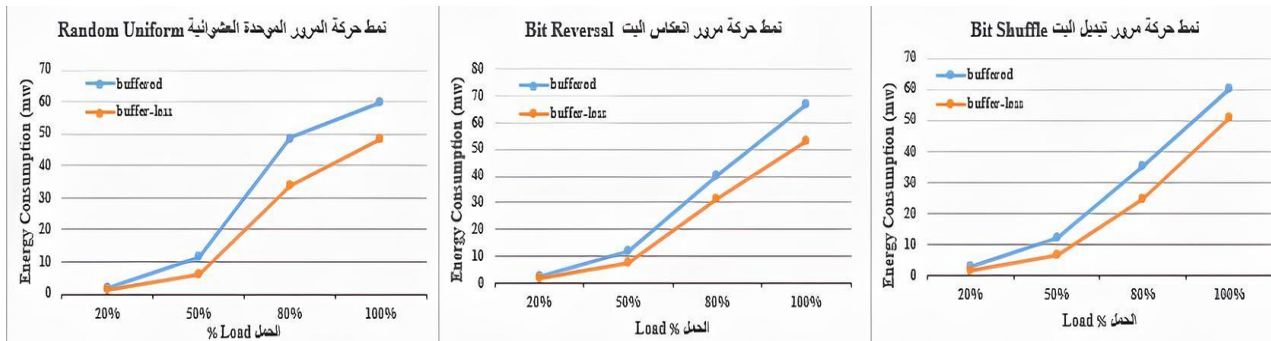
الجدول (2) - قيم الطاقة المستهلكة والإنتاجية وزمن التأخير للبنية FC-Mesh بحجم 9×9 وتحت أنماط مختلفة لحركة المرور وضمن أحمال متغيرة

البارامتر	الحمل load	حركة المرور الموحدة العشوائية		حركة مرور انعكاس البت		حركة مرور تبديل البت	
		Buffer-less	Buffered	Buffer-less	Buffered	Buffer-less	Buffered
الطاقة المستهلكة mw	20%	1.1	1.9	1.72	2.44	1.81	2.85
	50%	6.05	11.34	7.23	11.51	6.74	11.92
	80%	33.78	48.6	31.06	40.33	24.44	35.03
	100%	48.15	60.01	53.10	66.85	50.75	59.85
الإنتاجية Mbps	20%	211.13	199.06	231.8	212.11	217.66	202.29
	50%	121.05	112.79	116.54	109.31	108.91	101.68
	80%	90.26	83.04	86.21	77.45	82.34	72.99
	100%	69.89	64.24	65.93	58.96	68.22	60.2
زمن التأخير ms	20%	0.067	0.08	0.07	0.08	0.07	0.09
	50%	0.40	0.48	0.43	0.47	0.41	0.47
	80%	1.12	1.24	1.17	1.24	1.11	1.2
	100%	1.76	1.9	1.87	1.93	1.69	1.94

4-1 دراسة الطاقة المستهلكة:

عند الحمل المتوسط كانت معدلات الطاقة المستهلكة تتراوح بين 6 إلى 7 ميلي واط، ومع ازدياد معدل حقن الشبكة (تطبيق أحمال زائدة) لوحظ ارتفاع كبير باستهلاك الطاقة لحدود ثلاثة أضعاف، لكنه بقي أقل من القيم التي وصلت لها قيم الطاقة المستهلكة بحالة تطبيق المخازن المؤقتة "buffered" والتي تجاوزت 35mw باختلاف نمط المرور المطبق. يبين الشكل (9) قيم الطاقة المستهلكة على مستوى الشبكة FC-Mesh عند أحمال مختلفة ومن أجل أنماط حركة المرور الثلاثة المدروسة وبحالتين اثنتين للمقارنة: بحالة تطبيق مخازن مؤقتة buffered وبحالة التقليل من المخازن المؤقتة مع توجيه تكيفي وفق خوارزمية OE التكيفية "buffer-less". يتبين من الشكل نفسه أن نسبة التقليل من الطاقة بحالة التقليل من المخازن المؤقتة (الحالة المقترحة) تجاوزت 30% عند نمط حركة المرور الموحدة العشوائية، و22.9% عند نمط حركة انعكاس البت، أما عند تطبيق نمط تبديل البت فقد وصلت نسبة التقليل من الطاقة المستهلكة إلى 30.2% مقارنةً مع استخدام المخازن المؤقتة. يذكر أن نسبة التحسين كانت أكثر عن الأحمال المتوسطة والضعيفة حيث تراوحت بين 37-45%، كون استهلاك الطاقة يزداد مع زيادة الحمل المطبق.

الشكل (9) - معدل استهلاك الطاقة للشبكة FC-Mesh عند أحمال مختلفة ومن أجل أنماط حركة المرور الثلاثة المدروسة بحالة



تطبيق مخازن مؤقتة buffered وبحالة عدم تطبيق مخازن مؤقتة buffer-less في تصميم موجّهات العقد

2-4 دراسة بارامترات جودة الخدمة:

عادةً ما يتميز أداء شبكات الاتصالات الرقمية عموماً وشبكات NoC خصوصاً بعرض النطاق الترددي، الذي يمثل مقياس ثابت لسعة الشبكة. ومع ذلك، من المهم تحديد معدل الرسائل التي يتم إرسالها واستقبالها بشكل نهائي عبر الشبكة، وهو ما يمثل معدل الإنتاجية throughput. تعد الإنتاجية مقياساً مناسباً لشبكات NoC، ويمكن تعريفها على أنها إجمالي عدد الرسائل التي يتم إرسالها واستقبالها بنجاح عبر الشبكة لكل وحدة زمنية، وهي مقياس هام لمعدل النقل عبر الشبكة، وتُحسب بالمعادلة (2) الآتية:

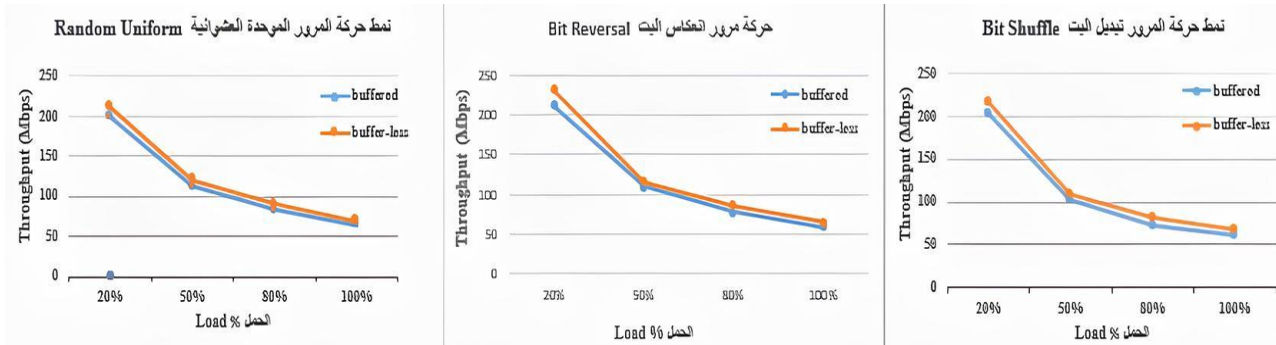
$$Throughput = \frac{total\ received\ flits \times packet\ length}{(number\ of\ nodes) \times (total\ cycles)} \quad (2)$$

حيث يحدد البسط إجمالي عدد الوحدات المستلمة مضروباً بطول الحزمة (طول البايت) packet length، أما المقام فهو حاصل جداء عدد عقد الشبكة وعدد دورات الساعة المستغرقة حتى إتمام الاستلام بنجاح لآخر رسالة. زمن وصول أو زمن تأخير الرسالة latency هو الوقت المستغرق منذ إرسال الرسالة من مصدرها حتى يتم تسليم تلك الرسالة إلى العقدة الوجهة الخاصة بها. يُعرف التفريغ أو زمن الانتقال للحمل الصفري للشبكة بأنه زمن الوصول عندما تعبر حزمة واحدة فقط الشبكة، ولا يأخذ هذا النموذج في الاعتبار التنافس بين الحزم. تُعرف العلاقة الممثلة لزمن التأخير من أجل K حزمة (بايت) تم استقبالها بشكل صحيح بالمعادلة (3):

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

حيث $packet\ latency_i$ تمثل زمن تأخير الحزمة (البايت) ذوات الرقم i. أما N تمثل عدد حزم البيانات التي وصلت إلى العقدة الهدف [33].

قمنا ضمن هذا القسم بتحليل النتائج التي توصلنا إليها بدراسة بارامترات جودة الخدمة المتمثلة بالإنتاجية وزمن التأخير للبنية FC-Mesh بحالتين مختلفتين لتنفيذ الموجه. يبين الشكل (10) قيم الإنتاجية مقاسة بMbps عند أحمال مختلفة ومن أجل أنماط حركة المرور بالحالتين المدروستين.

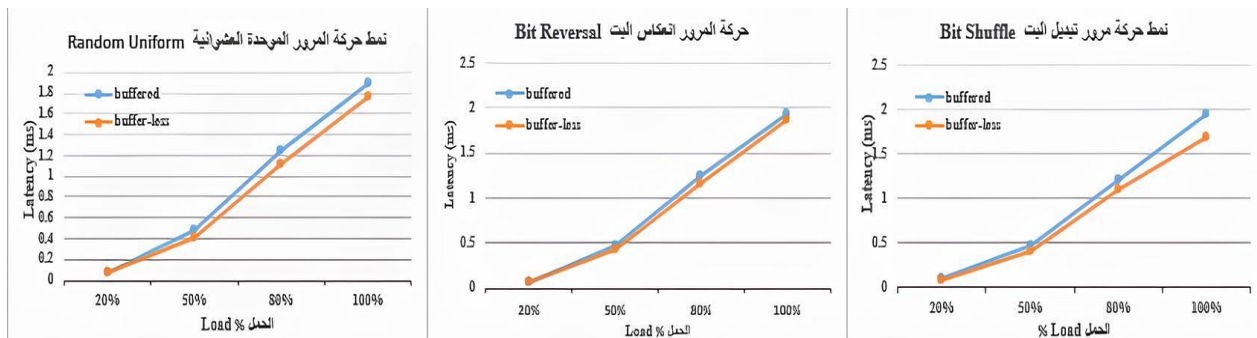


الشكل (10) – إنتاجية الشبكة FC-Mesh عند أحمال مختلفة ومن أجل أنماط حركة المرور الثلاثة المدروسة بحالة تطبيق مخازن مؤقتة buffered وبحالة عدم تطبيق مخازن مؤقتة buffer-less في تصميم موجهات العقد

أظهرت النتائج الموضحة بالشكل (10) السابق تحسناً لا بأس به من حيث الإنتاجية عند تصميم موجهات البنية FC-Mesh وفقاً للآليات المقترحة ضمن البحث، فقد لوحظ عدم وجود فوارق كبيرة بمستويات الإنتاجية بين

نمط حركة مرور وآخر بالمقارنة بنفس نموذجنا المقترح. بينما لو قمنا بمقارنة النموذج المقترح مع الحالة الثانية "buffered" من أجل حمل 80% على سبيل المثال نجد هناك زيادة في الإنتاجية بمعدل 7.9% عند نمط حركة المرور الموحدة العشوائية، وبمقدار 10.1% تحت نمط مرور انعكاس البت، وعند نمط حركة مرور تبديل البت وصلت نسبة زيادة معدل الإنتاجية إلى 11.3%.

أما بالنسبة لأزمنة التأخير الإجمالية للبنية FC-Mesh نجد أنه من أجل أحمال مختلفة وعند تصميم موجهات العقد وفقاً للطريقة المقترحة كانت قيم أزمنة التأخير أقل فيما لو تم تصميم الموجه مع مخازن مؤقتة وبدون تطبيق التوجيه التكيفي للانتقال بين العقد، كما هو مبين في الشكل (11).



الشكل (11) - قيم أزمنة التأخير للشبكة FC-Mesh عند أحمال مختلفة ومن أجل أنماط حركة المرور المدروسة بحالة تطبيق مخازن مؤقتة buffered وبحالة عدم تطبيق مخازن مؤقتة buffer-less في تصميم موجهات العقد

حيث نلاحظ أن قيم أزمنة التأخير في تصميمنا المقترح buffer-less كانت أقل منها في حالة استخدام المخازن المؤقتة -التمثلة بالتسمية (buffered) ضمن الشكل (11) نفسه- بالأخص مع تزايد الحمل، وهو مؤشر إيجابي، فقد كانت نسبة تخفيض زمن التأخير بمقدار 9.6% عند نمط حركة المرور الموحدة العشوائية، وبمقدار 5.6% عند نمط حركة مرور انعكاس البت، وبنسبة 7.5% عند نمط مرور تبديل البت، وكل ذلك عند الأحمال العالية 80%. فقد تراوحت قيم أزمنة التأخير عند هذا الحمل في نموذجنا المقترح بين (1.11-1.17) ms في حين كانت أقل تماماً من قيم أزمنة التأخير بالحالة الثانية "buffered" (1.20-1.24) ms. يشار إلى أن زمن التأخير يزداد مع زيادة الحمل المطبق على الشبكة، كما يفضل دوماً أن يكون زمن التأخير في شبكات NoC أقل ما يمكن.

النتائج والمناقشة:

استناداً إلى النتائج التي توصلنا إليها من دراسة بارامترات جودة الخدمة المتمثلة بالإنتاجية وزمن التأخير وكمية الطاقة المستهلكة للبنية FC-Mesh والمذكورة بالجدول (2)، فقد أثبتت التقنيات الثلاثة المقترحة بالبحث وهي: التقليل من المخازن المؤقتة (مخزن واحد) buffer-less مع تطبيق توجيه تكيفي وتخصيص منافذ العقد وفقاً لدرجة تعقيدها، أثبتت هذه التقنيات فعاليتها وأهميتها في تحسين بارامترات جودة الخدمة ومميزات الشبكة بالمقارنة مع حالة استخدام مخازن مؤقتة مع تطبيق توجيه حتمي، وكل ذلك من أجل شبكة بحجم 9×9 عقدة. فقد كانت نسب التحسين في استهلاك الطاقة جيدة ومناسبة بالأخص عند نمطي حركة المرور الموحدة العشوائية ونمط انعكاس البت بنسبة

تخفيض تجاوزت 30% بالحالتين. أما عند دراسة قيم الإنتاجية وزمن التأخير فقد لوحظ أن التقنية المقترحة في تصميم البنية الداخلية لموجهات العقد للبنية FC-Mesh ساهمت في زيادة إنتاجية الشبكة بنسبة تتراوح بين 7.9% إلى 11.3% تبعاً لنمط حركة المرور المطبق، وكان أفضلها عند نمط حركة مرور تبديل البت. كما قللت الطريقة المقترحة من زمن تأخير نقل البيانات للشبكة بنسب تتراوح بين 9.6% عند نمط حركة المرور الموحدة العشوائية، و 7.5% عند نمط تبديل البت، وبمعدل 5.6% عند نمط انعكس البت، لكن وبالعودة للجدول (2) يمكن القول أن نقل البيانات عبر البنية FC-Mesh وفقاً للآلية المقترحة في تصميم موجهات العقد كان أسرع ما يمكن عند نمط حركة مرور تبديل البت كونه حقق أقل قيمة لأزمة التأخير (1.11) ميلي ثانية. كل ذلك مما سبق ذكره هو من أجل حمل مطبق 80%، حيث تم اختيار هذا الحمل في المقارنة للحصول على تقييم حالة الشبكة في حالات تمرير عالية للرسائل، والتي تمثل الحالة التي تكثر فيها احتمالية حدوث ازدحام واختناقات.

بالمقارنة مع الدراسات المرجعية المذكورة سابقاً والتي تم الاعتماد عليها كونها استخدمت تقنية تصميم الموجه بدون مخزن مؤقت Buffer-less بالأخص المراجع (9-10-11-12-13) نستنتج أهمية تطبيق هذه التقنية في تصميم موجهات شبكات NoC كونها خفضت من الطاقة المستهلكة على مستوى الشريحة بنسب جيدة. مع ملاحظة أن هذه الدراسات عملت على شبكة Mesh، بينما قمنا بهذا البحث بتطبيق تقنية Buffer-less على البنية FC-Mesh، مع اعتماد خوارزمية توجيه OE التكيفية، وتخصيص منافذ موجهات العقد تبعاً لدرجة تعقيد العقد وموقعها ضمن الشبكة، بعدها قمنا بمقارنة الأداء مع حالة موجهات Buffered على البنية FC-Mesh نفسها لتقديم نتائج دقيقة وإثبات فاعلية الطريقة المقترحة في التصميم.

الاستنتاجات والتوصيات:

يعدّ جهاز التوجيه ضمن شبكات NoC كأى بنية تحتية أخرى أو مكون آخر للشبكة فهو بمثابة العمود الفقري لها، حيث يقوم بإرسال البيانات الواردة إلى مركز العقدة الهدف إذا كان متصلاً مباشرةً بمورد الوجهة، وإلا فسيضطر هذا الجهاز إلى إرسالها إلى جهاز توجيه آخر. يمكن تصميم الموجهات في الشبكات المدمجة على الشريحة مع مخازن مؤقتة أو بدونها. أثبتت الدراسات أن موجهات NoC غير المخزنة مؤقتاً تملك العديد من المزايا، أهمها القدرة على تقديم أداء متوافق تقريباً مع ما تقدمه موجهات NoC المخزنة مؤقتاً، مع استهلاك طاقة أقل بكثير وتعقيد أقل في التصميم. كل هذه الخصائص تجعل من NoCs الخالية من المخزن المؤقت خيار أفضل في التصميم مقارنةً بتصميمها المؤقت. قمنا بهذا البحث بتصميم موجه تكيفي مع تقليل عدد المخازن المؤقتة (مخزن واحد فقط) يعمل وفق خوارزمية OE التكيفية، وقمنا بتطبيقه على الشبكة المطورة FC-Mesh مع تقليل عدد المنافذ ضمن الموجه المصمم تبعاً لدرجة تعقيد العقد، حيث تم تصميم ثلاثة أصناف من الموجهات: خاصة بالعقد المركزية، وعقد الزوايا، وبقية العقد بالنسبة للبنية FC-Mesh. أظهرت نتائج المحاكاة التي أجريت على بنية الشبكة FC-Mesh بحجم (9×9) وعند أنماط مختلفة لحركة المرور، من خلال مقارنة الطريقة المقترحة في التصميم مع حالة استخدام مخازن مؤقتة وفق توجيه حتمي بأن الطريقة المقترحة ساهمت بتحسين بارامترات جودة الخدمة المتمثلة بالإنتاجية وزمن التأخير ومعدل استهلاك الطاقة بنسب جيدة، بالأخص فيما يتعلق باستهلاك الطاقة. فقد كان هناك تخفيضاً بمعدل الطاقة المستهلكة بنسب تراوحت بين 22.9% وحتى 30.4%، كما كان هناك تحسناً بالإنتاجية بنسبة وصلت 11.3% وتخفيضاً بزمن التأخير لحدود 9.6%، أي تحسين بمميزات الشبكة من خلال زيادة سرعة النقل عبر الشبكة.

يوصي البحث بإمكانية تطبيق المنهجية المقترحة بتصميم الموجه على العديد من بنى وشبكات NoC المعدلة أو المصممة، بالأخص البنى المطورة التي تدعم قابلية التوسيع لما له من نتائج إيجابية في سرعة نقل البيانات والتقليل من استهلاك الطاقة، فضلاً عن الحاجة لاستنزاف الموارد. كما يوصي البحث أيضاً باكتشاف طرق وأساليب أخرى لتخفيض استهلاك الطاقة لشرائح شبكات NoC، سواء على مستوى الوصلات أو على مستوى الواجهات الشبكية للشريحة.

References:

- [1]. P, Babu; S, Yadav; V, Holimath - *Advancing Healthcare with GPGPU and Energy Efficient NoC Architectures: A Comprehensive Survey*, International Conference on Ambient Intelligence in Health Care (ICAHC), Raipur Chattisgarh, India, 14 April 2025.
- [2]. F, Hosseini, A, Upadhyay, H, Zhao - *Survey of Network-on-Chip (NoC) for Heterogeneous Multicore Systems*, IEEE 17th International Symposium on Embedded Multicore/Many-core Systems-on-Chip (MCSoc), 03 January 2025.
- [3]. N, Reddy ; Z, Rahman; A, Ekuakille - *Enhancing Reliability and Energy Efficiency in Many-Core Processors Through Fault-Tolerant Network-on-Chip*, IEEE Transactions on Network and Service Management, Volume: 21, Issue: 5, Page(s): 5049-5062, 2024.
- [4]. L, Cheng; et al - *Minimizing Worst-Case Data Transmission Cycles in Wavelength-Routed Optical NoC through Bandwidth Allocation*, ICCAD '24, New York, USA. 2024.
- [5]. X, Yu; L, Tang; J, Mi, J, Liu - *Fault Tolerant and Quality of Service Aware Routing Algorithm Based on Priority Technique for Scalable Network on Chip Architectures*, Scientific Reports, doi:10.1038/s41598-025-20381-3, 2025.
- [6]. D, Chen; X, Wang; G, Cai; Z, Huang - *Design and Implementation of a NoC Router for Programmable System-on-Chip Platforms*, IEEE 4th International Symposium on Semiconductor and Electronic Technology (ISSET), 09 October 2025.
- [7]. P, Sivagamasundhari; M, Santhi - *Design of Low-Power Network on-Chip Using an Improved Congestion-Aware Virtual Channel Router with Power Gating Mechanism*, Analog Integrated Circuits and Signal Processing, Volume 125, article number 43, 22 October 2025.
- [8]. J, Debbarma; R, Banik; D, Debbarma - *Energy-Efficient Network-on-Chip Routers Using a Power Gated Round Robin Arbiter Ensuring Minimal Impact on Latency*, Results in Engineering, Volume 28, 2025.
- [9]. C, Nachiar; S, Sumathi - *Evaluation of Bufferless Network-On-Chip with Parallel Port Allocator*, International Research Journal on Advanced Science Hub IRJASH (ICARD), Volume 03. Issue 03S, March 2021.

- [10]. S, Nagaraju; S, Balasundaram; R, Balasundaram; K, Kumar - *Energy Efficient FSM based Elastic Buffer Routing Computation for NoC*, Journal of Optoelectronics Laser, Volume 41 Issue 9, 2022.
- [11]. R, Parepalli; S, Sharma; M, Naik - *Design and Analysis of 2D 4×4 Mesh NoC Architecture with Novel Bufferless Router for Optical Communication*, Walter de Gruyter GmbH, Berlin-Boston, May 6, 2025.
- [12]. T, Patil; A, Sandi - *Design and Implementation of Asynchronous NOC Architecture with Buffer-Less Router*, @ 2021 Elsevier, GNDEC, Bidar 585403, India, 2021.
- [13]. N, Majeed; S, Mahdi; M, Kadhim - *Design and implementation of high performance 2D mesh NoC based on new proposed router using FPGA. 7th International conference on contemporary information technology and mathematics (ICCITM)*, DOI: 10.1109/ICCITM53167.2021.9677773, 21 January 2022.
- [14]. K, Tatas - *Performance Analysis of 2D and 3D Bufferless NoCs Using Markov Chain Models*, Spiros Nikolaidis Technologies, 2 February 2022.
- [15]. A, Ejaz; I, Sourdis - *FastTrackNoC: A DDR NoC with FastTrack Router Datapaths*, Technical Report, Chalmers Univ. of Technology, Sweden, 12-Mar-2021.
- [16]. N.C, Sendhilkumar; R, Murugesan - *Area Efficient Reconfigurable Buffer for NoC Router*, ICCEMS-Materials Science and Engineering 925 (012065), 2020.
- [17]. M, Manzoor; R, Naaz Mir; M, Hakim - *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. 2021.
- [18]. L, Mo; et al - *Reliable and Energy Optimized Task Mapping for Heterogeneous Multicore NoC Based on Partial Task Duplication and Multipath Routing*, IEEE Internet of Things Journal, Volume: 12, Issue: 23, 22 September 2025.
- [19]. S, Wasala; et al - *Energy-Efficient QoS-Aware Scheduling for S-NUCA Many-Cores*, 26th International Symposium on Quality Electronic Design (ISQED), San Francisco, 2025.
- [20]. J, Olusegun; D, Andrew; F, Alex; E, Frank - *Review of Energy-Efficient NoC Router Design Techniques*, Computers and Electrical Engineering, 2024.
- [21]. M, Rezaei-Zare; M, Fathy - *Design of a High Performance Router with Distributed Shared-Buffer for Load Balancing for on-Chip Networks*, Microelectronics Journal, Vol 132, 2023.

- [22]. T, Vivek; K, Kavita; S, Smita - *An Efficient 4X4 Mesh Structure with a Combination of Two NoC Router Architecture*, International Journal of Sensors Wireless Communications and Control, Volume 11, Number 2, pp. 169-180 (12), 2021.
- [23]. S, Das - *Architecture of Multi-Processor Systems using Networks on Chip (NoC): An Overview*, CVR Journal of Science and Technology, Volume 22, June 2022.
- [24]. R, Parepalli; S, Sharma; M, Kumar Naik - *Design and Implementation of Novel Buffer-less NoC Router*, IEEE 4th International Conference on Soft Computing for Security Applications (ICSCSA), Salem, India, 18 March 2025.
- [25]. N, Malladhi; G, Attimarad - *Design and Development of Low Power NoC Architecture Using Clock Gating Technique for SoC Applications*, IOP publishing Engineering Research Express: Eng. Res. Express 7 (2025) 025316, 16 April 2025.
- [26]. M, Khan; Y, Durrani - *A Review of Optimization Techniques in Network-on-Chip (NoC) Architecture*, International Conference on Engineering & Computing Technologies (ICECT), Islamabad, Pakistan, 08 July 2024.
- [27]. A, Mahfoud; et al - *Building and Designing an FCM Routing Algorithm and Testing its Performance with Deterministic and Adaptive Routing Algorithms to Improve Quality of Service in Networks-on-Chip (NoC)*, Journal of Hama University, Vol.8, July 2025.
- [28]. R, Somisetty; et al - *Regional Congestion Aware Odd Even Routing with Fair Arbitration for Network on Chip*, Fourth International Conference on Electrical, Computer and Communication Technologies (ICECCT), Erode, India, 29 November 2021.
- [29]. I, Dimitrievski; V, Mollov - *Comparison Between Routing Algorithms Applied in NoC Architectures for Smart Ethernet Switches Routing Schemes*, International Scientific Conference Computer Science'2018.
- [30]. A, Mahfoud; et al - *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, 2025.
- [31]. Peratikou, A - *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, April 2014.
- [32]. A.B, Kahng - *ORION 2.0: A Power-Area Simulator for Interconnection Networks*, IEEE Trans. VLSI Syst, 20, (1), p. 191, 2012.
- [33]. M, Nejad - *Parametric Evaluation of Routing Algorithms in Network on Chip Architecture*. International Journal of Computer Systems Science & Engineering, Vol 35, No 5, September 2020.