A Comparative Study of The Proposed Methods and Approaches to Improve The Quality of Service in Networks-on-Chip

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

(Received 25 / 12 / 2024. Accepted 26 / 3 / 2025)

□ ABSTRACT □

Managing and improving the quality of service (QoS) in embedded multiprocessor systems (MPSoCs) that rely on network-on-chip (NoC) is still considered a major challenge in conjunction with running dozens of tasks at the same time, especially with the increasing number of nodes integrated on the same chip to meet the complexity of applications. This has been demonstrated in many research and academic studies through different methods and approaches. This research studied the methods and techniques proposed in previous research works in order to improve the quality of service in NoC and made a comparison between these methods in terms of their improvement rate for the quality of service parameters, which are determined by high throughput and low latency. The study concluded that modifying the link topology can reduce the amount of energy consumed by about 69.17% compared to the rates achieved by modifying the NoC network structure, modifying the routing algorithm, or modifying the router structure within the network. While the studies that modified the router structure showed lower performance in QoS when compared to modifying the general NoC network structure, which achieved the highest performance by a percentage ranging from 22% to 65% compared to the other three methods used.

Keywords: Networks on Chip NoC, Quality of Service QoS, Throughput, Delay time, Energy consumption rate.

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

* **Associate 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.**
*** **Assistant 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- Email: adam.y.mahfoud@tishreen.edu.sy**

دراسة مقارنة بين الأساليب والمنهجيات المقترحة لتحسين جودة الخدمة في الشبكات المدمجة على الشريحة

د. بلسم عيد*

د. محمد حجازية**

د. يعرب بدر***

آدم محفوض****

(تاريخ الإيداع ٢٥ / ١٢ / ٢٠٢٤. قُبِل للنشر في ٢٦/ ٣ / ٢٠٢٥)

□ ملخّص □

لا تزال تعتبر إدارة وتحسين جودة الخدمة في الأنظمة المضمنة متعددة المعالجات MPSoCs التي تعتمد الشبكات المدمجة على الشريحة NoC تمثل تحدياً كبيراً تزامناً مع تشغيل عشرات المهام في الوقت نفسه، وبالأخص مع تزايد عدد العقد المدمجة على نفس الشريحة بما يلبي التعقيد الحاصل في التطبيقات. وهذا ما تجلّى في العديد من الدراسات البحثية والأكاديمية من خلال طرق ومنهجيات مختلفة. درس هذا البحث الأساليب والتقنيات المقترحة في الأعمال البحثية السابقة بغية تحسين جودة الخدمة في شبكات NoC وإجراء مقارنة بين هذه الأساليب من حيث نسبة تحسينها لبارامترات جودة الخدمة والتي تتحدد بالإنتاجية العالية وزمن التأخير المنخفض. خلصت الدراسة إلى أنّ التعديل في طوبولوجيا الربط بإمكانه تقليل كمية الطاقة المستهلكة بحدود 69.17% مقارنةً بالنسب المحققة عن طريق تعديل بنية الشبكة NoC أو تعديل خوارزمية التوجيه أو تعديل بنية الموجه ضمن الشبكة. بينما أظهرت الدراسات التي عدلت في بنية الموجه أداءً أقل من حيث جودة الخدمة فيما لو تمت مقارنتها مع التعديل في البنية العامة للشبكة NoC والتي حقّقت أعلى أداء بنسبة تتراوح بين 65%–22% مقارنةً بالطرق الأخرى الثلاثة المتبعة.

الكلمات المفتاحية: الشبكات المدمجة على الشريحة، جودة الخدمة، الإنتاجية، زمن التأخير، معدل استهلاك الطاقة

حقوق النشر : مجلة جامعة تشرين– سورية، يحتفظ المؤلفون بحقوق النشر بموجب الترخيص CC BY–NC–SA 04

*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.

*** مدرّس – 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 – ايميل: adam.y.mahfoud@tishreen.edu.sy

مقدمة:

أدّى تطور تكنولوجيا تكامل العناصر المدمجة إلى اعتماد رقائق سيليكون مفردة في تصميم شرائح الدارات المتكاملة ICs النانومترية مع آلاف المليارات من الترانزستورات المتكاملة باستخدام تصميم نانومتر[1] . هذا يسمح بتكامل الآلاف من العناصر المتجانسة وغير المتجانسة معًا لإعطاء الفائدة الكاملة للتطبيق على شريحة واحدة تسمى System on Chip (SoC)، دخلت الأنظمة المدمجة على الرقاقة والتي تتكون من عدة نوى على شريحة واحدة عصر المليار ترانزستور، كما تحولت صناعة المعالجات الدقيقة من أحادية النواة إلى متعددة النوى، وفي نهاية المطاف إلى العديد من البنى الأساسية التي تحتوي على عشرات إلى مئات النوى المتشابهة مرتبة على معالج واحد. عند تصميم مثل هكذا أنظمة مثلما هو الحال عند تصميم المعالجات الدقيقة لا بدّ من تحقيق عدة اعتبارات وهي الأداء العالي، الترابط المرن والقابل للتطوير، والاتصال الفعّال بين النوى المترابطة. يشكّل موضوع تحقيق الاتصال الفعال بين النوى تحدّياً كبيراً لكل من الأوساط الأكاديمية والصناعية. قبل ظهور الشبكات المدمجة على الشريحة Network-on-Chip (NoC) كانت غالبية البنى تعتمد على الممرات المشتركة أو الأسلاك الرفيعة، ولم تكن تلبي حاجة التطبيقات المطوّرة كونها كانت تعاني من عدم إمكانية قابلية التوسيع. حلّت شبكات NoC معظم المشاكل التي عانت منها الأنظمة السابقة ليس فقط قابلية التوسيع، وإنّما أيضاً مشاكل أخرى منها زيادة عرض النطاق الترددي، وتقليل استهلاك الطاقة، فضلاً عن تحسينات بارامترات جودة الخدمة وهي الإنتاجية العالية وزمن التأخير المنخفض. كل ذلك بفضل الآلية التي يتم بها نقل الرسائل في شبكات NoC والتي تتميز بها دوناً عن الأنظمة السابقة، بسبب طبيعة الربط والاتصال البيني التي تتمتع بها شبكات NoC.

تؤمّن الشبكة المدمجة على الشريحة اتصال عدد كبير من النوى على شريحة واحدة، يتم من خلالها تمرير حزمة واحدة أو أكثر عبر الشبكة المكونة من أجهزة توجيه وقنوات متعددة. لقد نشأت فكرة شبكات NoC في أوائل القرن الحادي والعشرين، ومنذ ذلك الحين وحتى اليوم تم اقتراح وتصميم بنى ونماذج مطورة على هذا النوع من شبكات الربط [2].

تهدف غالبية الدراسات الحديثة الى تطوير شرائح NoC بغية مواكبة الزيادة المتسارعة في عدد العناصر المدمجة على نفس الشريحة من خلال منهجيات وأساليب وحلول وتقنيات على مستوى بنية الشريحة ككل أو على مستوى مكون محدد من مكوناتها الأساسية سواءً العقد، أو الوصلات، أو الموجهات. كأمثلة على الحلول المتبعة بالدراسات السابقة تحقيق التزامن في الاتصالات ضمن الشريحة، تطوير تقنيات الاتصال بين العقد، إضافة وصلات والتعديل على بنية الاتصال في الشريحة، تعديل في البنية الداخلية للموجه، تطوير تقنيات التبديل ضمن الموجه، تطوير وتصميم خوارزميات توجيه هجينة أو معدلة وخوارزميات التحكم بالتدفق.. وغير ذلك، الهدف الأساسي لما سبق هو تحسين جودة الخدمة QoS المقدمة في هذه الشرائح.

حدود البحث:

تتضمن حدود البحث المقارنة بين الأساليب والتقنيات المقترحة بالدراسات المرجعية لتحسين جودة الخدمة QoS المطبقة على شبكات NoC، ويمكن حصر هذه الحدود وفق ما يلي:

١. التطرق لشبكات NoC المدمجة على شرائح تكاملية ثنائية البعد والتي تستخدم الوصلات السلكية بين العقد.
٢. الدراسة تشمل شبكات الربط النظامية regular (دون التطرق لشبكات irregular).
٣. المقارنة بين الأبحاث المشمولة بالدراسة تتم جميعها على شبكات من نوع 2D−Mesh.
٤. لا تشمل الدراسة شبكات NoC التي تستخدم نظام الاتصال الضوئي بين العقد أو شبكات الاتصال اللاسلكي wireless.

٥. إن عدد الدراسات المرجعية الداخلة بالمقارنة ضمن الدراسة الاستقصائية هي سبع دراسات بالتحديد لكل منهجية متبعة من منهجيات تحقيق جودة الخدمة QoS بشكل منفصل.

٦. بارامترات جودة الخدمة المأخوذة بالاعتبار هي الإنتاجية وزمن التأخير مع دراسة مستقلة لمعدل استهلاك الطاقة كون بعض الدراسات المرجعية الداخلة بالدراسة لم تتطرق لبارامتر استهلاك الطاقة.

أهمية البحث وأهدافه:

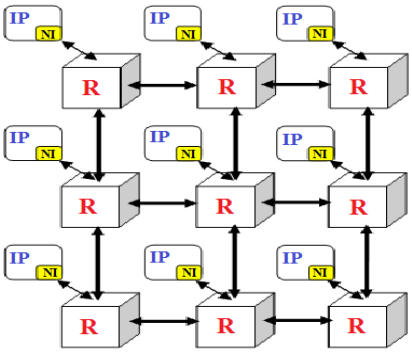
تعتبر جودة الخدمة (QoS) أحد الجوانب المهمة للبنية التحتية للاتصالات، بشكل عام تحدد جودة الخدمة الأداء العام للشبكة، على وجه الخصوص الأداء الذي يراه مستخدمو الشبكة. جودة الخدمة لها أهمية خاصة عند التعامل مع أنماط حركة مرور مختلفة إلى جانب تطبيق متطلبات خاصة للشبكة. بالعموم يمكن تحقيق جودة الخدمة في الشبكات المدمجة على الشريحة بعدة طرائق ومنهجيات، ولعلّ هذا المجال كان محط اهتمام العديد من الباحثين على مدار العشر سنوات الأخيرة. يتفرّد البحث في التوسّع بالمنهجيات المقترحة في الدراسات السابقة لتحسين جودة الخدمة QoS في الشبكات المدمجة على الشريحة NoC للوصول إلى الأداء الأمثل والمقارنة بين النتائج التي وصلت إليها هذه الدراسات.

طرائق البحث ومواده:

١. بارامترات جودة الخدمة في الشبكات المدمجة على الشريحة:

تتكون أي شبكة NoC من أربعة عناصر أساسية متكاملة، هذه العناصر الأربعة هي العقدة node (IP)، الوصلة link (L)، الموجه router (R)، والواجهة الشبكية network interface (NI). تتصل هذه العقد مع بعضها البعض عبر الموجهات حيث يتم ربط كل عقدة مع الموجه الخاص بها من خلال الواجهة الشبكية عبر وصلة الاتصال. يبين الشكل (١) عناصر شبكة NoC بحجم 3×3.

الغاية من تحقيق جودة الخدمة هي خدمة التطبيقات المختلفة وتلبية متطلباتها المفروضة. بالنتيجة يكمن التحدي في تحسين قدرة الشبكة NoC على تلبية متطلبات التطبيق. يتلخص مفهوم جودة الخدمة بنقل البيانات بكميات كبيرة خلال زمن وصول منخفض عبر الشبكة مع الالتزام بمجموعة من المعايير كمعدل استهلاك الطاقة وقابلية التوسيع والمساحة المخصصة للرقاقة وغيرها.



الشكل (1) – العناصر الأساسية للشبكة المدمجة على الشريحة [3]

توجد العديد من بارامترات جودة الخدمة التي تدخل في تقييم الأداء والتي أيضاً تحدد نسبة جودة الخدمة المقدمة من قبل الشريحة ومدى تحقيقها لمتطلبات التطبيقات والأنظمة الفيزيائية والالكترونية وغيرها.. ووفقاً للدراسات والأدبيات السابقة فإن هذه البارامترات المتفق عليها هي الإنتاجية throughput وزمن التأخير (زمن الوصول) latency (dealy)، وإضافةً لما سبق توجد بارامترات أخرى تدخل بتحديد جودة الخدمة وليست أقل أهمية من سابقتها وهي معدل الطاقة المستهلكة energy consumed ومساحة الرقاقة chip area. ومع ذلك اختلفت الدراسات السابقة بعدد البارامترات المدروسة لجودة الخدمة في شبكات NoC، فبعضها تطرق لدراسة بارامترين أو لثلاثة بارامترات وبعضها لأربعة، لكن بالعموم جميع الدراسات أخذت بالاعتبار فقط الإنتاجية وزمن التأخير. وبناءً عليه فإن الأداء performance لشبكات NoC يُقاس بالنسبة بين الإنتاجية إلى زمن التأخير[4,5]. يمكن تعريف بارامترات جودة الخدمة على الشكل الآتي:

- **زمن التأخير Latency (L):** هو جزء من التأخير الفعلي للشبكة، أو الزمن اللازم لنقل الحزمة أو الباكيت من العقدة A إلى العقدة B ضمن الشبكة. ويمثل زمن الوصول للباكيت بين العقد. عموماً إن لم يتم استيفاء متطلبات الكمون، قد تتسبب الشبكة بتأخير كبير في الاتصال بين المكونات.
- **الإنتاجية Throughput (TH):** وتمثل عدد الحزم المرسلة بنجاح ضمن الشبكة خلال واحدة الزمن (bits transmitted per nano-second)، وهي تمثل معدل النقل عبر الشبكة. بالمقارنة مع متطلبات عرض النطاق الترددي، فإن الإنتاجية هي مقياس أكثر ملاءمة لتقييم أداء الشبكة. حيث توفر الإنتاجية الحد الأقصى لحركة المرور المقبولة وترتبط بأقصى معدل للبيانات للشبكة [7,6].

٢. الدراسات المرجعية:

يعتبر موضوع دراسة تحقيق جودة الخدمة QoS في الشبكات المدمجة على الشريحة NoC موضوع مهم ومتطور باستمرار نتيجة التطور السريع الذي تشهده هذه الأنظمة، وقد نال اهتمام العديد من الأكاديميين والباحثين.

معظم الطرق المقترحة بالدراسات السابقة التي كان هدفها تحقيق جودة الخدمة QoS في شبكات NoC أولت الاهتمام على تقنية التبديل في نقل البيانات سواء لجميع العقد IPs أو لنطاق محدد منها على مستوى الشبكة، والبعض الآخر تطرق لدراسة منهجيات مطوّرة لجدولة نقل الرزم ضمن شبكات NoCs. دراسات أخرى اتجهت إلى تطوير بنية الربط بين العقد أو اقتراح بروتوكولات توجيه محسنة أو من خلال التعديل في البنية الداخلية لجهاز التوجيه للشريحة.

بالعموم يمكن تصنيف الطرق والمنهجيات المقترحة من قبل الدراسات السابقة لتحسين جودة الخدمة في الشبكات المدمجة على الشريحة NoC إلى أربعة طرق ومنهجيات وهي:

2-1 تحسين جودة الخدمة من خلال التعديل في بنية الشبكة NoC:

إن التصميم الأمثل للبنية العامة للشبكة NoC يلعب دوراً مهمّاً وأساسياً في الوصول إلى مستويات عالية من الأداء الأمثل للشريحة من حيث تقليل معدل استهلاك الطاقة وزيادة الإنتاجية وتقليل زمن التأخير، ويتمثل ذلك بتصميم البنية التحتية لشبكة NoC من حيث طريقة ربط الموجهات مع بعضها وتصميم قنوات الاتصال وبروتوكولات بث الحزم عبر هذه القنوات، وتقسيم الشبكة إلى شبكات فرعية، وغير ذلك. جميع تلك الطرق السابقة تساهم إلى حد كبير في تحسين أداء الشبكة ككل والوصول إلى قيم عالية لبارامترات جودة الخدمة QoS. العديد من الدراسات السابقة اعتمدت تصميم بنية الشبكة NoC وفقاً لأساليب مطورة. كالدراسة [8] التي تم فيها تقليل عدد روابط الاتصال وعدد الموجهات من خلال تقسيم شبكة NoC إلى مناطق صغيرة مزودة بموجهات مركزية ويتم التوجيه في المسارات الكبيرة من خلال

الموجهات المركزية حسب المنطقة. تم من خلال هذه الدراسة تحسين أداء NoC وتقليل استهلاك الطاقة (حيث حققت 38 mW بالمقارنة مع خوارزميات HCCR,XY,Penta NoC على التوالي 38,40.9,39) وتخفيض متوسط زمن التأخير للشبكة وتحسين بالإنتاجية وموثوقية الشبكة.

تم تصميم بنية الشبكة الموحدة (USNA) بالدراسة [9] والتي يمكن تخصيصها لطوبولوجيا مختلفة، حيث توفر الشبكة USNA مرونة عالية كما تدعم جودة الخدمة QoS لكل من الموجهات والروابط بالنسبة للإنتاجية وزمن التأخير. حققت البنية المقترحة في هذه الدراسة أداء جيد تحت أنماط حركة مرور مختلفة وتوفير كبير من حيث معدل استهلاك الطاقة وبمساحة الرقاقة، حيث تم تخفيض زمن التأخير بمعدل ١١% بالمقارنة مع الشبكة DMesh وحقّقت استهلاكاً أقل بالطاقة مقارنةً بالبنيتين NePA و DMesh بمعدل 2.12 و 1.13 مرة، وبالنسبة للمساحة المخصصة للرقاقة فقد كانت البنية المقترحة أقل بمعدل 2.35 مقارنةً بالبنية DMesh وتقليل بعدد القنوات الافتراضية VCs بمقدار ٣١% لكن إنتاجية البنية المقترحة كانت أقل بمعدل 6.15% من إنتاجية البنية DMesh بينما كانت أعلى بمقدار 49.18% من إنتاجية البنية NePA .

قامت الدراسة [10] بتصميم بنية Dual Data-Rate (DDR) NoC التي تعتبر تعديل على البنية Single (SDR) Data-Rate من خلال التخلص من الركود الموجود في مسار البيانات، حيث أن جهاز التوجيه يمرر الرزم عبر المراحل المخصصة للعبور عبر قفزات ضمن الشبكة (من الشرق إلى الغرب ومن الشمال إلى الجنوب وبالعكس، وعند الدخول من الشبكة أو الخروج منها). توصلت النتائج النهائية للدراسة إلى أن البنية DDR تفوقت على البنية SDR من خلال تقليل زمن الوصول بمعدل ٤٠%، وزيادة الإنتاجية بنسبة ٢٠%.

اعتمدت الدراسة [11] تصميم بنية توجيه ميكروية لشرائح NoC تسمى SmartFork تدعم البث المتعدد للحزم، هذه البنية ساهمت في تحسين أداء جودة الخدمة من حيث زمن التأخير والإنتاجية وتوفير المساحة المخصصة ومعدل استهلاك الطاقة. حققت البنية المقترحة تحسيناً بالأداء بالمقارنة مع البنيتين الداخلتين ضمن الدراسة بمقدار 11% و ١٣%، حيث حسّنت الإنتاجية بمعدل ١٥–١٨% عند VC=4، كما حققت تخفيضاً بزمن التأخير بمقدار ٢٦% و 31%، بالنسبة لمعدل الطاقة المستهلكة فقد كان هناك تقليل بـ12.37%، وتقليل بالمساحة المخصصة للرقاقة بمعدل(9–10)%.

الدراسة [12] اقترحت نموذج Roundabout R-NoC المدورة. تعتمد R-NoC على التوجيه التكيفي الداخلي الذي يحدد المسار بناءً على استخدام المخازن المؤقتة المرنة في التحكم بالتدفق. وهو نوع ذكي من بروتوكولات المصافحة بطريقة مشابهة للدارات الغير متزامنة. تم دراسة الأداء بالمقارنة مع الشبكة القياسية، وقد أظهرت النتائج تحسين الإنتاجية بنسبة ٦١% و88% بالنسبة لنمطي حركة مرور، وتخفيض زمن التأخير بمعدل 87%، وتقليل معدل الطاقة المستهلكة بنسبة ٩%، كما تم تخفيض المساحة المخصصة للشريحة بمعدل 13.7%.

بغية الحاجة إلى تحقيق كمون منخفض ومرونة عالية في الأداء فقد اقترحت الدراسة [13] البنية PCCNoC (Packet Connected Circuit NoC)، وهي بنية هجينة تعتمد على الدمج بين تقنيتي تبديل الحزم وتبديل الدارة، وهذا ما يحقق تخفيض الحمل وتوجيه مرن وزمن وصول منخفض جداً لنقل البيانات، مما يجعل هذه البنية ملائمة لأنظمة SoC المتطورة متعددة النواة والغير متجانسة على مستويات نظام مختلفة تعمل بالزمن الحقيقي. ساعدت هذه البنية على تحسين الإنتاجية بنسبة ٢٤٢%، وخفضت زمن التأخير بمعدل 97%، وبشكل وسطي فقد قلّلت من المساحة المخصصة للرقاقة بنسبة 81.46%، وقللت من معدل الطاقة المستهلكة بنسبة 86.68%.

تم في الدراسة [14] تصميم بنية NoC بالاعتماد على طوبولوجيا Mesh بعد حذف وصلات وأجهزة توجيه معينة. وتم تطبيق خوارزمية توجيه تكيفية لنقل الحزم عبر البنية الغير نظامية بشكل موثوق. وتم تصميم موجه غير متجانس يتم فيه تخصيص فتحات المخزن المؤقت ديناميكياً أثناء وقت التشغيل باستخدام خوارزمية إدارة المخزن المؤقت. هذه الآلية ساهمت بتخفيض متوسط زمن الوصول بمعدل 30.42%، وتحسين بالإنتاجية بنسبة 18.33%، كما قلّلت من معدل الطاقة المستهلكة بنسبة ٥٣% وحققت نصف مساحة السيليكون المخصصة فقط مقارنةً بعمق المخزن المؤقت لجهاز التوجيه الثابت.

قامت الدراسة [15] بتصميم بنية NoC قابلة لإعادة التشكيل ديناميكياً بالاعتماد على المخازن المؤقتة وغير المؤقتة الديناميكية بآن واحد(dynamically buffered and bufferless reconfigurable NoC (DB2R NoC. تم اعتماد خوارزمية التوجيه XY وبتطبيق بروتوكول التخديم وفق الطلب Flexible Direction Order (FDOR)، وتمت الدراسة على شبكتين بحجم ٣×٣ و ٤×٤ ببنية خالية من الجمود deadlock. البنية المصممة حققت تحسيناً بالإنتاجية بمعدل 35%، وتقليل زمن الوصول بنسبة ٢٣%، كما تمّ تخفيض المساحة المخصصة للشريحة بمعدل 47%. حيث تم اختبار التصميم على معدل حقن ١٠%.

2-2 تحسين جودة الخدمة وفقاً لخوارزمية التوجيه:

تعتبر هذه الطريقة من أكثر الأساليب المعتمدة لتحسين أداء الشبكات المدمجة على الرقاقة بالنسبة للدراسات الباحثة في هذا المجال. حيث تعتمد تحديد المسار الذي ستسلكه الرسالة للانتقال من عقدة إلى أخرى. تعتمد هذه المنهجية تطوير أو تحسين خوارزمية التوجيه بين العقد إما من خلال تصميم خوارزميات مطورة مدركة للازدحام أو بناء خوارزميات تعتمد تقنيات الذكاء الصنعي والتعلم العميق أو بالتعديل في خوارزمية التوجيه المطبقة على البنى ثنائية الأبعاد لشبكات NoC.

الدراسة [16] قامت بتطبيق البروتوكول MPLS على شبكة NoC وفق طبولوجيا Mesh وتمت المقارنة بين تقنيتي wormhole بالاعتماد على القنوات الافتراضية و MPLS وفق شبكة fat-tree، وقد أثبتت الدراسة أنّ تقنية MPLS تدعم جودة الخدمة من حيث الإنتاجية وزمن التأخير، كما أن تطبيق MPLS على طبولوجيا fat-free تتفوق على طبولوجيا Mesh من حيث متوسط زمن الوصول للحزمة. وقد كانت البنية المصممة أفضل بـ٥ مرات من حيث الإنتاجية فيما لو تم التصميم بالاعتماد على القنوات الافتراضية. كما كان هناك تخفيض بمقدار 1.5 من حيث زمن التأخير.

قامت الدراسة [17] بإجراء تقييم لخوارزميات التوجيه تحت أنماط مختلفة لحركة المرور بغية تحقيق جودة الخدمة في شبكات NoCs، 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.

تمّ في الدراسة [18] بناء مخطط توجيه منخفض الكلفة وخالٍ من الأخطاء يسمى TFRF لشبكات NoCs ويعتمد توجيه قائم على المنطق، حيث أظهر مخطط توجيه TFRF أنه يدعم متطلبات جودة الخدمة و يمتلك أداء أفضل وموثوقية محسّنة وأعباء أقل مقارنةً بأحدث مخططات التوجيه الموثوقة الداخلة معه بالمقارنة تبعاً للدراسة نفسها. حيث تم تقليل زمن التأخير بمقدار 6.48%، وتم تحسين الإنتاجية بمعدل ١.٦٧%، وتوفير باستهلاك الطاقة بمعدل 33.14%.

في الدراسة [19] تمّ تصميم نموذج جديد لرسم خرائط توزيع النوى المتصلة على شرائح NoC بهدف تقليل الكلفة وتأخير الاتصال من خلال تطبيق خوارزمية MOPSO-CD على شبكة 2D-Mesh بهدف تحسين مشكلة الازدحام، وقد بيّنت النتائج النهائية للدراسة أن خوارزمية MOPSO-CD أفضل من خوارزمية PSO والخوارزمية الجينية

genetic من حيث الكلفة وزمن التأخير، حيث تبيّن أن الخوارزمية المقترحة أفضل بـ1.1 مرة مقارنةً بالخوارزمية الجينية، وأفضل بـ0.5 مرة مقارنةً بخوارزمية PSO وذلك من حيث زمن التأخير، أما من حيث الكلفة فقد كانت الخوارزمية المقترحة أفضل بـ2.7 مرة مقارنةً بالخوارزمية الجينية، وأفضل بـ0.16 مرة مقارنةً بخوارزمية PSO.

تم تصميم خوارزمية توجيه قائمة على المعرفة knowledge-based memetic algorithm (KBMA) في الدراسة [20] وتمت مقارنتها مع خوارزميتي PSO و GA مع شبكات أخرى وهي Torus, BFT, Ring ,Mesh، حيث تبين أن الخوارزمية المقترحة تتفوق في الأداء على خوارزميتي GA و PSO من حيث الإنتاجية وزمن التأخير ومعدل استهلاك الطاقة. فمن أجل الشبكة Mesh تفوقت الخوارزمية المقترحة من حيث معدل استهلاك الطاقة بمقدار 10,29% مقارنةً بالخوارزمية الجينية GA و8.33 % مقارنةً بخوارزمية PSO، أما من حيث زمن التأخير فقد كان زمن التأخير للخوارزمية المقترحة أقل بـ5% مقارنةً بالخوارزمية الجينية GA و2.92% مقارنةً بخوارزمية PSO. كانت إنتاجية خوارزمية KBMA أفضل من خوارزمية GA بمقدار ٩%.

اعتمدت الدراسة [21] آلية تقسيم الشبكة لعناقيد clusters وتم تصميم خوارزمية (CACBR) Congestion Aware Cluster Buffer Base Routing للكشف عن الازدحام بغية تحسين جودة الخدمة، وقد أظهرت النتائج النهائية للدراسة تقليل متوسط زمن التأخير بمقدار 2.5–13% وتحسين الإنتاجية بمقدار 57–9% تبعاً لنمط حركة المرور.

تمّ اقتراح خوارزمية توجيه مدركة للازدحام في الدراسة [22] اعتماداً على تقسيم الشبكة لمناطق (منطقة الحافة والمنطقة المركزية) حيث يتم تقسيم عقد الشبكة إلى ثلاث أولويات ومنطقتين، وقد حقّقت الخوارزمية المقترحة والتي تمّ تسميتها ParRouting زيادة بالإنتاجية بمعدل 38.81% وقلّلت من متوسط زمن التأخير للباكيت بمقدار 53.4%.

في الدراسة [23] تم بناء آلية توجيه تعتمد خوارزمية (IWO Invasive Weed Optimization)، وقد أظهرت النتائج مقارنة مع عدة خوارزميات توجيه أخرى تحسين بكلفة الاتصال وتحسين بالإنتاجية وتقليل من استهلاك الطاقة وتقليل من زمن التأخير، حيث حسّنت خوارزمية IWO المقترحة بالدراسة من معدل استهلاك الطاقة بمقدار 15, 10, 7 ,7 بالمائة مقارنة بخوارزميات NMAP, CASTNET, CMAP, OnYX على الترتيب، كما قلّلت من زمن التأخير بمقدار 11, 4, 5, 5 بالمائة مقارنة بخوارزميات NMAP, CASTNET, CMAP, OnYX على الترتيب، أمّا بالنسبة للإنتاجية فقد حسنت خوارزمية IWO معدل الإنتاجية بمقدار 9, 9, 4, 10 بالمائة مقارنة بخوارزميات NMAP, CASTNET, CMAP, OnYX على الترتيب.

تم اقتراح نموذج توجيه Hoplite-Q [24] يعتمد على التوجيه المدرك للأولوية من خلال توجيه الحزم ذات الأولوية الأعلى، من خلال ثلاث عمليات أساسية وهي: إضافة البتات ذات الأولوية الأعلى إلى الحزمة التي يتم توجيهها، إضافة مخزن مؤقت إضافي للموجه، استخدام طرق ديناميكية في عملية التوجيه وفي تطبيق الأولوية واستخدام المخزن المؤقت. هذه الطريقة زادت من إنتاجية التطبيقات ذات الأولوية العالية بنسبة ١٨٠%، وتقليل زمن الوصول بأسوأ حالة إلى 150%، مع تقليص المساحة المشغولة على شريحة Altera Arria 10 AX115S بنسبة ١٣٠%.

تم تطوير خوارزمية هجينة (ScRN) مدركة للازدحام من جهة وتعتمد على اختيار المسار وفق خوارزمية الجار الأقرب في الدراسة [25]. تعتمد الخوارزمية على استخدام محلل لفحص حزم حركة المرور ضمن الشبكة ومن ثم تحديد مناطق محلية اعتماداً على عدد القفزات، وعليه يتم اختيار قناة الإخراج الأفضل تبعاً لحركة المرور. أثبتت

الخوارزمية المقترحة بالمقارنة مع الخوارزميات المماثلة لآلية العمل من خلال المحاكاة تبعاً لعدة سيناريوهات انخفاضاً في زمن وصول الحزمة بنسبة ٣٨%، وزيادة بالإنتاجية بنسبة 20%، وأيضاً تخفيض 10% من معدل استهلاك الطاقة.

2-3 تحسين جودة الخدمة وفقاً لطبولوجيا الربط:

وفقاً لهذ المنهجية فإن تحسين أداء جودة الخدمة المقدمة من الشريحة يعتمد على بناء طوبولوجيا ربط نموذجية أو بمعنى آخر تصميم خريطة توصيل بين العقد ملائمة للأداء الأمثل للشبكة إما من خلال الدمج بين شبكات الربط الداخلة في تصميم طوبولوجيا الشبكة NoC، عندها يتم استبدال كل عقدة من الشبكة الأساسية بشبكة ثانية (مختلفة أو مشابهة للأصل) والحصول بذلك على بنية هجينة لشبكتين متداخلتين، أو من خلال التعديل على بنية التوصيل الأساسية للشبكة من خلال إضافة وصلات بطريقة متجانسة تشكل بنية جديدة. العديد من الدراسات والأبحاث اعتمدت كلتا الطريقتين لتحسين أداء بارامترات جودة الخدمة، فمثلاً الدراسة [26] اعتمدت تصميم طوبولوجيا CCX-Torus من خلال إضافة أربعة وصلات قطرية للشبكة Torus وقد ساهمت هذه الوصلات المضافة في تحقيق انخفاض كبير بزمن التأخير بمقدار85.24% وتحسين في الإنتاجية بنسبة 17.86%، كما تم تقليل متوسط عدد القفزات بنسبة 9.58% بالمقارنة مع الشبكات المشابهة.

الدراسة [27] قامت بإجراء تقييم تحليلي وتجريبي لدراسة تأثير الطوبولوجيا على الأداء بالنسبة لأربع معماريات NoC دخلت بالتقييم، وهي شبكات Mesh, Floded Torus, de Bruijn inspired Mesh-based (DIMB) Linearly Extensible Triangle Network (LECΔ)، وذلك في ظل أنماط حركة مرور مختلفة. تبين بالنتائج النهائية أن أداء LECΔ كان الأفضل بسبب خصائصها المميزة بالأخص القطر الصغير حيث حققت تفوقاً بالإنتاجية بمقدار 75% وتقليل بزمن التأخير بمعدل ٥٠% مقارنةً مع البنى الأخرى الداخلة بالدراسة، بينما حققت شبكتا Mesh و FTorus تقريباً نفس قيم بارامترات الأداء.

الدراسة [28] عدّلت على طوبولوجيا الشبكة Mesh من خلال إضافة وصلات تصل العقد البعيدة عن بعضها بالرؤوس الأربعة للشبكة، حيث تم الحصول على إحاطة خارجية تامة للشبكة. هذه الدراسة قلّلت المسافة الوسطية للشبكة Mesh حتّى ٧%. كما أنّها حسنت من إنتاجية الشبكة Mesh بمقدار ١٠%، كما قللت زمن التأخير بحدود ٢١%.

تم تصميم بنية توصيل معدلة عن الشبكة 2D-Mesh اسمها King-Mesh [29] من خلال إضافة وصلتين إضافيتيين لكل عقدتين متقابلتين قطرياً. الهدف من هذه البنية تحسين الأداء مقارنةً بشبكات Mesh وTorus، حيث تم تطبيق تقنية توجيه تعتمد على اختيار المسار القائم على الوزن Weight Path Selection (WPS) ضمن خوارزمية XY، وذلك بغية زيادة سرعة النقل وتقليل استهلاك الطاقة وتقليل عدد القفزات من خلال إيجاد المسار الأقصر، وبالفعل ساهمت الطوبولوجيا King-Mesh المقترحة على تقليل زمن التأخير بمعدل ٢٣%، وتحسين الإنتاجية بمعدل ٢٩%، كما قلّلت من معدل استهلاك الطاقة بمعدل 33.3% وكل ذلك مقارنةً بطوبولوجيا Mesh.

الدراسة [30] عدّلت على طوبولوجيا التوصيل للشبكة Torus من خلال إضافة وصلات قطرية للبنية Torus للحصول على بنية تم تسميتها Hexagonal X-Torus، هذه الدراسة حسنت من إنتاجية الشبكة Torus بمقدار57.99%،كما قللت من زمن التأخير بحدود 98.71% وقلّلت متوسط عدد القفزات حتّى 23.08% مقارنةً مع الشبكة.

الدراسة [31] تم فيها تصميم شريحة NoC قابلة للتوسيع وفعالة من حيث استهلاك الطاقة من خلال الدمج بين الحلقة Ring والشبكة 2D-Mesh. تم تطبيق خوارزمية توجيه تكيفي تلائم متطلبات الطوبولوجيا المقترحة. تمت الدراسة وفق عدة أنماط لحركة المرور وتوصلت إلى تحسين الإنتاجية مقارنة بالشبكة Mesh ثنائية الأبعاد بمعدل 8.8%، وتقليل

زمن تأخير بمقدار 119.6% بمتوسط سيناريوهات حركة المرور المأخوذة ضمن الدراسة، كما تمّ توفير معدل الطاقة المستهلكة ضمن الشريحة بنسبة 141.3% عند توصيل ١٠٢٤ عقدة، فضلاً عن قابلية التوسيع المرتفعة للبنية المقترحة.

تم اقتراح طوبولوجيا هجينة قابلة للتوسيع اسمها Hybrid Scalable-Minimized-Butterfly-Fat-Tree (H-SMBFT) وذلك في الدراسة [32]. H-SMBFT حسنت الأداء بسبب قلة المتطلبات فيما يتعلق بعدد الروابط وتعقيد جهاز التوجيه وقابلية التوسيع العالية. البنية الهجينة المقترحة تمت مقارنتها مع البنيتين BFT وSMBFT حيث قللت من زمن التأخير بنسب 35.63% و17.36%، وساعدت على توفير الطاقة المستهلكة بمعدل 32.91% و 16.83%، وتم تحسين الإنتاجية بمعدل 21.4% و 5.2% على الترتيب في كل مرة، كما خفضت البنية المقترحة معدل المسافة الوسطية للشبكة والمساحة المخصصة للرقاقة بالمقارنة مع البنيتين السابقتين.

2-4 تحسين جودة الخدمة من خلال التعديل في بنية الموجه:

تعتمد هذه الطريقة على التعديل في البنية الداخلية للموجه router والذي يعد أحد أهم مكونات أي شبكة NoC كونه المسؤول عن توجيه رزم البيانات والرسائل بين عقد الشبكة وفقاً لخوارزمية التوجيه التي تحدد مسار الانتقال. أثبتت العديد من الدراسات المرجعية أن التعديل في بنية الموجه من حيث عدد الدورات أو تقنية التبديل المعتمدة أو آلية تشكيل الرزم يساهم في تحسين جودة الخدمة للشبكة المدمجة على الشريحة، فعلى سبيل المثال في الدراسة [33] تمّ تصميم وتنفيذ موجه هجين متعدد الأوضاع قابل لإعادة التشكيل يدعم تحويل الحزم ديناميكياً خلال زمن التشغيل، وقد حقّق هذا الموجه إنتاجية عالية وكفاءة عالية ومعدل استهلاك جيد للطاقة والمساحة المحجوزة له كانت مقبولة. تمت الدراسة وفقاً لعدة سيناريوهات لوضعيات إرسال البيانات، وبالمجمل فقد حسّنت البنية المقترحة الإنتاجية بمعدل ١٤%، وقللت من زمن التأخير بمقدار 49.6%.

الدراسة [34] تم اقتراح مخطط جدولة باستخدام خوارزمية RED المعدلة يعتمد على استراتيجية إدارة المخزن المؤقت والتحكم الفعال بالتدفق بغية تحقيق جودة الخدمة المطلوبة. حيث يتم ضبط قيم العتبة لخوارزمية RED باستخدام المعلومات المحلية للمخزن المؤقت، وبناء على ذلك يتم تقليل وقت انتظار الحزم الواردة. أظهرت نتائج المحاكاة تحسين بالإنتاجية بمقدار 29.5% وتقليل زمن التأخير بمعدل 41.5% وذلك بالنسبة لشبكة بحجم ٢×٢، بينما كانت نسبة التحسين بالإنتاجية 45.5% وبزمن التأخير ٣٣% بالنسبة لشبكة بحجم ٤×٤.

الدراسة [35] اقترحت تصميم مطور لبنية الموجه ضمن شبكة NoC يعتمد إدارة تدفق البيانات اعتماداً على تصميم شريحة قابلة لإعادة التشكيل reconfigurability للشريحة ثنائية الأبعاد 2D-Mesh NoC وتنفذ توزيع العمليات السريعة والفعالة بهدف إدارة تدفق البيانات مع التركيز على موضوع قابلية التوسيع والحفاظ على أعلى مستوى من الأداء. كان معدل استهلاك الطاقة بحدود 2.4w فيما لو تمت مقارنته بمعدل استهلاك الطاقة بحال تطبيق موجه عادي في شبكة Mesh بحجم 128 عقدة والذي يصل إلى 4.5w، الأمر يصبح أسوأ مع زيادة حجم الشبكة إلى 1024 عقدة حيث يكون استهلاك الطاقة مساوٍ لـ 32.8w بالتالي تكون نسبة التحسين باستهلاك الطاقة 141.26%. أما بالنسبة لمعدل التحسين في زمن التأخير فقد أثبت الموجه المطور تخفيضه لزمن التأخير لشبكة Mesh وبحجم ١٦×٣٢ و١٦×٦٤ لنسبة تفوق 100%. أمّا بالنسبة للإنتاجية فقد كانت نسبة التحسين عموماً جيدة إذا ما قورنت بنسب التحسين السابقة، حيث بلغت 16.4% من أجل شبكة بحجم ١٦×٤ و 9.95% من أجل شبكة بحجم ١٦×٢.

في الدراسة [36] تم تصميم موجه سريع وقليل الاستهلاك للطاقة، وفق بنية تصميم C-S-box و Inv MixColumns يعتمد تقنية تشفير خاصة ويستخدم نموذج دوران round-robin وفق تقنية تبديل crossbar. الموجه المصمم حقق تحسيناً بالإنتاجية بمعدل ٣٣%، وتخفيضاً بزمن التأخير بنسبة ٣٣%، وقلّل معدل استهلاك الطاقة بنسبة 51%.

في الدراسة [37] تم تصميم موجه يعتمد نموذج دوران round-robin الموزع والمعدل، والمصمم وفق آلية تبديل الحزم وإعادة توجيهها Store and Forward packet وفق نمط توجيه تكيفي بالحد الأدنى، وذلك بغية التقليل من زمن التأخير وتوفير مساحة الرقاقة. الموجه المقترح تم تطبيقه على شبكة Mesh ثنائية البعد وقد أثبتت النتائج التجريبية أن الموجه المقترح ساعد على توفير ٢٥% من المساحة المخصصة للشريحة، وقلّل من زمن التأخير للشريحة بمعدل 43.98%، مع تحسين معدل الإنتاجية بنسبة ٢٥%، وكذلك قلّل من استهلاك الطاقة بمعدل 48.9% وذلك من أجل عرض بيانات ٣٢ bit وفقاً للدراسة.

الدراسة [38] تم اقتراح تقنية فعالة ++SMART تتميز بتعدد القفزات وآلية الالتفاف ضمن الموجه، وتعتمد على أربع أفكار رئيسية وهي: عبور ذكي، مخازن مؤقتة متعددة الحزم، التمرير عبر المخازن المؤقتة الغير فارغة، وإعادة توزيع الحزم مع اتباع سياسة إعادة تخصيص القنوات الافتراضية VCs الأكثر استخداماً . تم تطبيق الدراسة على طوبولوجيا Mesh بحجم ٨×٨ و4×4 وباعتماد خوارزمية XY. توصلت الدراسة إلى تحسين في الإنتاجية بنسبة 42.2%، وتقليل زمن التأخير بنسبة تصل حتى 31.9%، مع توفير بالمساحة المخصصة وتقليل معدل استهلاك الطاقة بمعدل 75.84%.

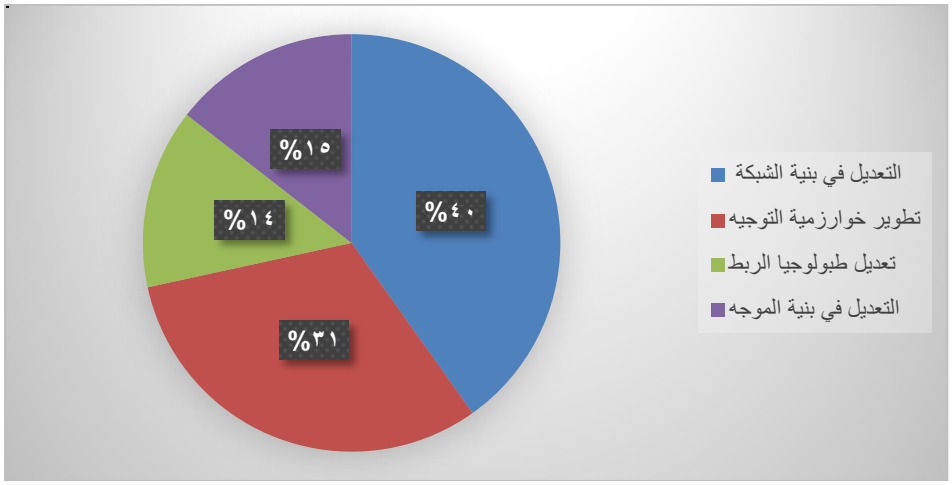
قدمت الدراسة [39] تصميماً جديداً لموجه يعمل وفق تقنية معدل البيانات المضاعف(Dual DataRate (DDR، وذلك على شريحة FastTrackNoC. هذا الموجه يعمل على تقليل زمن التأخير عن طريق تجاوز تبديل مرحلة العبور (ST). تعتمد آلية الموجه على إضافة مسار سريع بين رأس المخزن المؤقت للقناة الافتراضية عند كل منفذ دخل ورابط عند الخرج المقابل. وقد خلصت الدراسة إلى أن بنية الموجه المقترح ساهمت بتقليل زمن التأخير بحدود 40–9%، وقد حقّقت تحسيناً بالإنتاجية بنسبة تتراوح بمجال 19–16%، مع توفير بمعدل الطاقة المستهلكة بنسبة ٥%.

٣- النتائج الاستقصائية والمناقشة:

يمكن تلخيص الدراسات المرجعية السابقة وفقاً للأساليب الأربعة المقترحة لتحسين بارامترات جودة الخدمة QoS كما هو مبين بالجدول (١)، وذلك من حيث قيم بارامترات جودة الخدمة (الإنتاجية–زمن التأخير). يبيّن القسم الأيسر من الجدول المتوسط الحسابي لقيم هذين البارامترين اعتماداً على سبع دراسات مأخوذة بالنسبة لكل منهجية مقترحة على حدا، أمّا الحقل الأخير من الجدول ذاته فيبين نسبة الأداء الوسطية (الإنتاجية بالنسبة إلى زمن التأخير). يبيّن الشكل (٢) نسبة التحسين بالأداء المحققة بالدراسات المرجعية وفقاً للمنهجية المقترحة في تحسين جودة الخدمة QoS في شبكات NoC وعددها أربعة منهجيات (التعديل في بنية الشبكة NoC – التعديل في خوارزمية التوجيه للشريحة – تعديل طوبولوجيا التوصيل بين العقد – تطوير بنية جهاز التوجيه ضمن شبكة NoC)، وذلك بالنسبة لـ28 دراسة مرجعية تمت دراستها ضمن هذه المقالة، كما يبيّن الجدول (٢) مقارنة بين الدراسات المرجعية المشمولة بالبحث والتي تطرقت لدراسة معدل استهلاك الطاقة من حيث نسب التحسين في كمية الطاقة المستهلكة تبعاً للمنهجية المقترحة، مع التنويه إلى أنّ بعض الدراسات المشمولة بالمقارنة لم تتطرق إلى دراسة استهلاك الطاقة.

الجدول (١) – مقارنة بين الدراسات المرجعية (28 دراسة مرجعية) من حيث تحسين جودة الخدمة تبعاً للمنهجية المقترحة

المنهجية	المقترح	المرجع	العام	قيم التحسين في بارامترات جودة الخدمة		متوسط التحسين في بارامترات جودة الخدمة		معدل الأداء لكل منهجية
				الإنتاجية	زمن التأخير	الإنتاجية	زمن التأخير	
التعديل في بنية الشبكة NoC	USNA	[9]	2020	٤٩.18	11	67.21	45.63	1,47
	DOR	[10]	2021	20	40			
	SmartFork	[11]	2021	١٨	31			
	R-NoC	[12]	٢٠٢٢	٨٨	٨٧			
	PCCNoC	[13]	2023	242	97			
	RTBM	[14]	٢٠١٥	18.33	30.42			
	DB2R	[15]	2022	35	23			
تطوير خوارزمية التوجيه	TFRF	[18]	2020	1.67	6.48	44.92	38.87	1.15
	KBMA	[20]	٢٠١٩	9	٥			
	CACBR	[21]	2020	٥٧	١٣			
	ParRouting	[22]	2020	38.81	53.4			
	IWO	[23]	2020	8	6.25			
	Hoplite-Q	[24]	٢٠١٨	180	150			
	ScRN	[25]	2022	20	38			
تعديل طبولوجيا الربط	CCX-torus	[26]	2017	17.86	85.24	31.44	61.88	0.51
	LECΔ	[27]	2020	75	50			
	MD-Mesh	[28]	2017	10	21			
	King-Mesh	[29]	2019	29	23			
	MX-Torus	[30]	2019	57.99	98.71			
	Mesh+Ring	[31]	2019	8.8	119.6			
	H-SMBFT	[32]	2019	21.4	35.63			
التعديل في بنية الموجه	Reconfigurable router	[33]	2019	14	49.6	25.58	48.57	0.53
	M-RED	[34]	2020	29.5	41.5			
	co-design-based dataflow threads	[35]	2024	16.4	100			
	AES router-CSBOX	[36]	2019	33	33			
	MACS	[37]	2021	25	43.98			
	SMART++	[38]	2019	42.2	31.9			
	FastTrackNoC +DDR	[39]	2021	19	40			



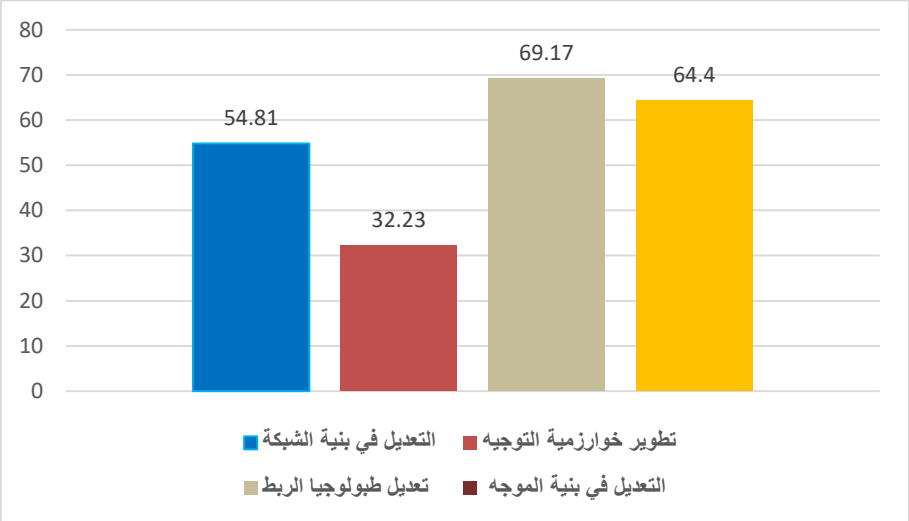
الشكل (٢) – نسبة التحسين بالأداء المحقق بالدراسات المرجعية وفقاً للمنهجية المقترحة لتحسين جودة الخدمة QoS في شبكات NoC

الجدول (٢) – مقارنة بين الدراسات المرجعية المشمولة بالبحث والتي تطرقت لدراسة معدل استهلاك الطاقة من حيث نسب التحسين في كمية الطاقة المستهلكة تبعاً للمنهجية المقترحة

المنهجية	المقترح	المرجع	العام	معدل التحسين في استهلاك الطاقة	متوسط تحسين استهلاك الطاقة وفقاً للمنهجية المقترحة
التعديل في بنية الشبكة NoC	USNA	[9]	2020	113	54.81
	SmartFork	[11]	2021	12.37	
	R-NoC	[12]	٢٠٢٢	٩	
	PCCNoC	[13]	2023	86.68	
	RTBM	[14]	٢٠١٥	53	
تطوير خوارزمية التوجيه	TFRF	[18]	2020	33.14	32.23
	KBMA	[20]	٢٠١٩	10,29	
	ParRouting	[22]	2020	98	
	IWO	[23]	2020	9.75	
	ScRN	[25]	2022	10	
تعديل طبولوجيا الربط	King-Mesh	[29]	2019	33.3	69.17
	Mesh+Ring	[31]	2019	141.3	
	H-SMBFT	[32]	2019	32.91	
التعديل في بنية الموجه	co-design-based dataflow threads	[35]	2024	141.26	64.4
	AES router-CSBOX	[36]	2019	51	
	MACS	[37]	2021	48.9	
	SMART++	[38]	2019	75.84	
	FastTrackNoC+DDR	[39]	2021	5	

يتضح من الجدول (١) أن التعديل في بنية الموجه حقّقت أداءً أقل من حيث جودة الخدمة فيما لو تمت مقارنته مع التعديل في البنية العامة للشبكة NoC والتي حقّقت أعلى أداء مقارنةً بالتقنيات الثلاثة الأخرى المدروسة ضمن البحث بنسبة تتراوح بين 65%–22%. وقد كانت نسبة التحسين في الأداء متقاربة عند الدراسات التي عملت على تعديل طوبولوجيا الربط أو تلك التي عدّلت في بنية الموجه.

يبيّن الشكل (٣) معدلات التخفيض بالطاقة المستهلكة بالنسبة للدراسات المرجعية المشمولة بالدراسة وفقاً للمنهجية المقترحة لكل منها في تحسين جودة الخدمة QoS والمصنفة بالأصناف الأربعة، حيث يتضح من الشكل نفسه بأن التعديل في طوبولوجيا الربط بإمكانه تقليل كمية الطاقة المستهلكة بحدود 69.17% مقارنةً بالتقنيات الأخرى المدروسة، بينما كان معدل التخفيض من الطاقة المستهلكة عن طريق التعديل في بنية الموجه هي الأقل بحدود 32.23%.



الشكل (٣) – مقدار التخفيض من كمية الطاقة المستهلكة وفقاً للمنهجية المقترحة في تحسين جودة الخدمة QoS بالنسبة للدراسات المرجعية المشمولة بالبحث

الاستنتاجات والتوصيات:

إنّ البارامترات التي تدخل في قياس جودة الخدمة المقدمة ضمن شبكات NoC هي الإنتاجية وزمن التأخير، وهذه البارامترات أيضاً تدخل في تقييم الأداء العام لهذه الشبكات. هناك العديد من تقنيات تحسين جودة الخدمة في الشبكات المدمجة على الشريحة وجميعها تعطي نتائج متفاوتة تبعاً لعدة معايير واعتبارات تؤخذ عند الدراسة، لكنه بالإمكان تعميم عدم وجود معيار ثابت بالنسبة لتحسين جودة الخدمة حيث لا توجد أي علاقة ثابتة بين المنهجية المتبعة ونسبة الأداء المحققة. صنّف هذا البحث التقنيات المقترحة من قبل الدراسات المرجعية لتحسين جودة الخدمة في شبكات NoC إلى أربعة طرق ومنهجيات. وقد تبيّن بالمقارنة أن التعديل في طوبولوجيا الربط يقلل بنسبة عالية من كمية الطاقة المستهلكة بحدود 69.17% مقارنةً بالنسب المحققة عن طريق تعديل بنية الشبكة NoC أو تعديل خوارزمية التوجيه أو تعديل بنية الموجه ضمن الشبكة، وذلك لكون هذه الطريقة تقلل من الحمل الإجمالي على مكونات الشبكة. بينما أظهرت الدراسات التي عدلت في بنية الموجه أداءً أقل من حيث جودة الخدمة فيما لو تمت مقارنتها مع التعديل في البنية العامة للشبكة NoC والتي حقّقت أعلى أداء بنسبة تتراوح بين 65%–22% مقارنةً بالطرق الأخرى المتبعة.

كذلك تبين أن نسبة التحسين في أداء جودة الخدمة كانت متقاربة عند الدراسات التي عملت على تعديل طوبولوجيا الربط وتلك التي عدّلت في بنية الموجه.

References:

[1]. Panem, C; Rane, U; Gad, V; Kovendan, A; Sridharan, D; Gad, R; Naik, G, "**Performance Analysis of 16 × 16, 32 × 32, 64 × 64 2-D Mesh Topologies for Network on Chip**", IEEE WiSpnet conference, 2017.

[2]. Yoon, Y, "**Design and Optimization of Networks-on-Chip for Future Heterogeneous Systems-on-Chip**", Ph.D of Philosophy in the Graduate School of Arts and Sciences, Columbia University, 2017.

[3]. Bouguettay, A; Toum, S; Kimou, T; Boudjedr, A; "**A new 2D mesh routing approach for networks on chip**", Rev. Sci. Technol., Synthèse 32: 98 -105 (2016).

[4]. Swain, A, K; Kamal Reddy, T, L; Mahapatra, K, K; Singh, J, K; "**Performance Evalulation of Different Routing Algorithms in Network on Chip**", IEEE Asia Pacific Conference on Postgraduate Research in Microelectronics and Electronics (PrimeAsia), 2013.

[5]. Singh, J, K, "**Performance Evaluation of Different Routing Algorithms in Network on Chip**", Master of Technology in Electronics and Communication Engineering, National Institute of Technology, Rourkela, Odisha, India, June 2, 2014.

[6]. CHE. J, "**Performance Evaluation of Network-on-Chip Architectures**", Master of Engineering, Faculty of Engineering and Applied Science Memorial University of Newfoundland, May 2012.

[7]. Tatas, K; Jantsch, A; Siozios, K; Soudris, D. "**Designing 2D and 3D Network-on-Chip Architectures**". Springer New York Heidelberg Dordrecht London, 271P, 2014.

[8]. Chabok, J, M; Alavi, A, "**Reducing the number of passing links in the 2D-NoC for performance and reliability improvement**", Islamic Azad University, Mashhad, Iran, 2020.

[9]. Duy Bui, P; Lee, C, "**Unified System Network Architecture: Flexible and Area-Effecient NoC Architecture with Multiple Ports and Cores**", Electronics 2020, 15 August 2020.

[10]. EJAZ, A, "**Dual Data Rate Network-on-Chip Architectures**", Ph.D of Computer Engineering Department of Computer Science & Engineering Chalmers University of Technology G¨oteborg, Sweden, 2021.

[11]. Konstantinou, D; Nicopoulos , C; Lee, J; "**Multicast-Enabled Network-on-Chip Routers Leveraging Partitioned Allocation and Switching**", Integration VLSI journal 77 (2021) 104–112, 2021.

[12]. Effiong, C; Sassatelli, G; Gamatié, A, "**Combined Distributed Shared-Buffered and Diagonally-Linked Mesh Topology for High-Performance Interconnect**", Micromachines 13, 2246, 2022.

[13]. Zhou, A; Hao, P; Liu, D, "**PCCNoC: Packet Connected Circuit as Network on Chip for High Throughput and Low Latency SoCs**", Micromachines, 14, 501, 2023.

[14]. Umamaheswari, S; Meganathan, D; Raja Paul, J, "**Runtime Buffer Management to Improve The Performance in Irregular Network-on-Chip Architecture**", Indian Academy of Sciences, Sa-dhana- Vol. 40, Part 4, pp. 1117–1137, June 2015.

[15]. Sujata, S.B; Anuradha, S, "**Design and Analysis of Buffer and Bufferless Routing Based NoC For High Throughput and Low Latency Communication on FPGA**", International Journal of Pervasive Computing and Communications, ISSN: 1742-7371, 18 February 2022.

[16]. Sllame, A; Salama, N, "**Applying MPLS Technique as On-Chip Communication Means for Network-on-Chip with Mesh Topology**", Proceeding of the 28th Conference of FRUCT Association, 2021.
[17]. Lallas, E, "**An Evaluation of Routing Algorithms in Traffic Engineering and Quality of Service Provision of Network on Chips**", Scientific Research Publishing Engineering, 13, 1-17, January 12, 2021.
[18]. Tyagi, S; Agarwal, A; Avasthi, V; Maheshwari, P, "**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, 2020.
[19]. Darbandi, M; Ramtin, A, R; Sharafi, O, K, "**Tasks Mapping in The Network on a Chip Using an Improved Optimization Algorithm**", International Journal of Pervasive Computing and Communications Vol. 16 No. 2, pp. 165-182, 2020.
[20]. Alagarsamy, A; Gopalakrishnan, L; Ko, S, "**KBMA: A Knowledge-Based Multi-Objective Application Mapping Approach For 3D NoC**", IET Computers & Digital Techniques, IET Comput. Digit. Tech, Vol. 13 Iss. 4, pp. 324-334, The Institution of Engineering and Technology 2019.
[21]. Bahman, F; Reza, A; Reshadi, M; Vazifedan, S, "**CACBR: Congestion Aware Cluster Buffer Base Routing Algorithm with Minimal Cost on NoC**", CCF Transactions on High Performance Computing (2020) 2:297–306, 18 March 2020.
[22]. Fang, J; Zhang, D; Li, X, "**ParRouting: An Efficient Area Partition-Based Congestion-Aware Routing Algorithm for NoCs**", Micromachines 2020,11,1034, 25 November 2020.
[23]. Kalahroudi, P, M; Yaghoubi, E; Barekatain, B, "**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, 16 Sep, 2020.
[24]. Siddhartha, S; Kapre, N, "**Hoplite-Q: Priority-Aware Routing in FPGA Overlay NoCs**", IEEE 26th Annual International Symposium on Field-Programmable Custom Computing Machines (FCCM), 2576-2621, 11 September 2018.
[25]. Trik, M; et.al, "**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, 2022.
[26]. Kumar, D; Sehgal, V, K; Nitin, "**Center Concentrated X-Torus Topology**", Journal of Telecommunication, Electronic and Computer Engineering, Vol. 9 No. 3-6, 2017.
[27]. Gautam, S; Umar, S; Samad, A, "**Comparative Performance Evaluation of NoC-based Multicore Systems through Traffic Engineering**", Urkish Journal of Computer and Mathematics Education Vol.11 No.03 2182-2190, 2020.
[28]. Punhani, A, "**On Improving Throughput and Latency of Mesh Interconnection Networks**", Ph.D of Philosophy, Department of Computer Science & Engineering and Information Technology Jaypee University of Information Technology Waknaghat, Solan-173234, Himachal Pradesh, India, July, 2017.
[29]. Sobana, S; Madhubala, T; Sakira Parveen, A; Karthika, P, "**A Proficient Performance Scrutiny of King Mesh Topology Based on the Routing Algorithms**", International Journal of Innovative Technology and Exploring Engineering (IJITEE) ISSN: 2278-3075, Volume-8 Issue-9, July 2019.
[30]. Kumar, D, "**On Performance of Modified Torus Interconnection Networks**", Ph.D of Philosophy, Department of Computer Science & Engineering and Information

Technology Jaypee University of Information Technology Waknaghat, Solan-173234, Himachal Pradesh, India May 2019.
[31]. Mazumdar, S; Scionti, A, "**Ring-Mesh: A Scalable and High-Performance Approach for Many Core Accelerators**", Dept. of Information Engineering and Mathematics University of Siena, Italy, 4 Nov, 2019.
[32]. Gulzari, U, A; et.al, "**A Low Latency and Low Power Indirect Topology for On-Chip Communication**", University of Science and Technology, Poland, PLoS ONE, October 2, 2019.
[33]. Nguyen, H; Tran, X, "**A Novel Reconfigurable Router for QoS Guarantees in Real-time NoC-Based MPSoCs**", Journal of Systems Architecture, Journal Pre-proof Published by Elsevier B.V. 2019.
[34]. Rad, F; Reshadi, M; Khademzadeh, A, "**Flow Control and Scheduling Mechanism to Improve Network Performance in Wireless NoC**", IET Commun, The Institution of Engineering and Technology, Vol. 14 Iss. 14, pp. (2231-2239), 2020.
[35]. Mazumdar, S; et.al, "**NoC Based Hardware Software CO-Design Framework for Dataflow Thread Management**", The Journal of Supercomputing 79:17983–18020, 22 Jan 2024.
[36]. N.L. Venkataraman; R. Kumar, "**An Efficient NoC Router Design By Using an Enhanced AES with Retiming and Clock Gating Techniques**", John Wiley & Sons, Ltd., 14 November 2019.
[37]. Ashok Kumar, K; Dananjayan, P; Vanga, K, R, "**Low Latency NoC Switch using Modified Distributed Round Robin Arbiter**", Journal of Engineering Science and Technology Review 14 (3) (2021) 76 – 84, 26 June 2021.
[38]. Pérez, I; Vallejo, E; Beivide, R, "**SMART++: Reducing Cost and Improving Efficiency of Multi-Hop Bypass in NoC Routers**", NoCS '19, October 17–18, 2019, New York, NY, USA, 2019.
[39]. Ejaz, A; Sourdis, I, "**Fast Track NoC: A DDR NoC with FastTrack Router Datapaths**", Technical Report, Chalmers Univ. of Technology, Sweden, 12-Mar-2021.