

مقارنة أداء وفعالية خوارزميات التوجيه في الشبكات ضمن رقاقة (NoC).

الطالبة المهندسة: زينب محمد
إشراف الدكتور: مازن يوسف
كلية الهندسة الميكانيكية والكهربائية - قسم الهندسة الالكترونية والاتصالات - جامعة البعث

الملخص

ان الشبكة ضمن رقاقة Network on Chip (NoC) هي عبارة عن نموذج تم تطويره لإرسال مختلف أنواع الإشارات في الأنظمة ضمن رقاقة System on Chip (SoC). ومن خلال التطور الكبير في مجال صناعة الدارات المتكاملة (Integrated Circuits (IC)) كانت هناك محاولات لإنجاز أكبر كم من الشبكات على الرقائق وذلك للوصول إلى رقائق مثالية مع فعالية مرتفعة. ومن أجل تعزيز هذه الفعالية في هذا النوع من الأنظمة لابد من استخدام خوارزميات توجيه ذات صفات جيدة. بشكل عام يجب أن تحقق الـ NoC بعض متطلبات تحسين الأداء مثل زمن الاستجابة القصير (Low Latency)، الإنتاجية العالية و الاستهلاك المنخفض للطاقة في الشبكة.

هذه المقالة تقارن أداء مختلف خوارزميات التوجيه المستخدمة في NoC، حيث تم اختيار خوارزميات توجيه محددة (Deterministic) كخوارزمية XY، بالإضافة لخوارزميات توجيه جزئية التكيف كتلك القائمة على الـ (Turn Model) وهي السالب أولاً (Negative First)، الشمال أخيراً (North Last)، الغرب أولاً (West First)، وخوارزمية التوجيه المتكيفة (Adaptive) ومنها خوارزميات الـ Odd-Even، DyAD و DyXY. تم اختيار هذه الخوارزميات لأنها تتميز بخلوها من الجمود (Deadlock).

الكلمات المفتاحية:

شبكة على رقاقة NoC، التوجيه، خوارزمية XY، خوارزمية OD، خوارزمية DyAD، خوارزمية التوجيه Negative First، خوارزمية التوجيه West First، خوارزمية التوجيه

(North Last)، خوارزمية التوجيه DyXY، (Turn Model)، مقاييس الأداء P،
الاستجابة، الإنتاجية، استهلاك الطاقة، نيرغام NIRGAM.

Comparison The Performance And Efficiency Of Routing Algorithms In Network On Chip.

Eng: Zeinab Mohamad

Dr: Mazen Yousef

Department Of Electronic And Telecommunication Engineering
Faculty Of Mechanic And Electricity Engineering – Albaath University

Abstract

Network on Chip (NoC) is a new paradigm to make the interconnections inside a System on Chip (SoC). By the developments achieved in integrated circuits (IC) manufacturing there have been attempts to design vast amounts of network on the chips in order to achieve more efficient and optimized chips. A better routing algorithm can enhance the performance of NoC. Every NoC should satisfy some performance requirements like low latency, high throughput and low network power.

This article compares the performance of the various routing algorithms in NoC, where chosen deterministic routing algorithm, The XY routing algorithm was chosen due to its wide use and ease of implementation, and partial adaptive algorithms such as those based on turn model (Negative First, West First, North Last), In addition to adaptive routing algorithms like OE, DyAD and DyXY. all of these routing algorithms had deadlock-free ability.

Keywords

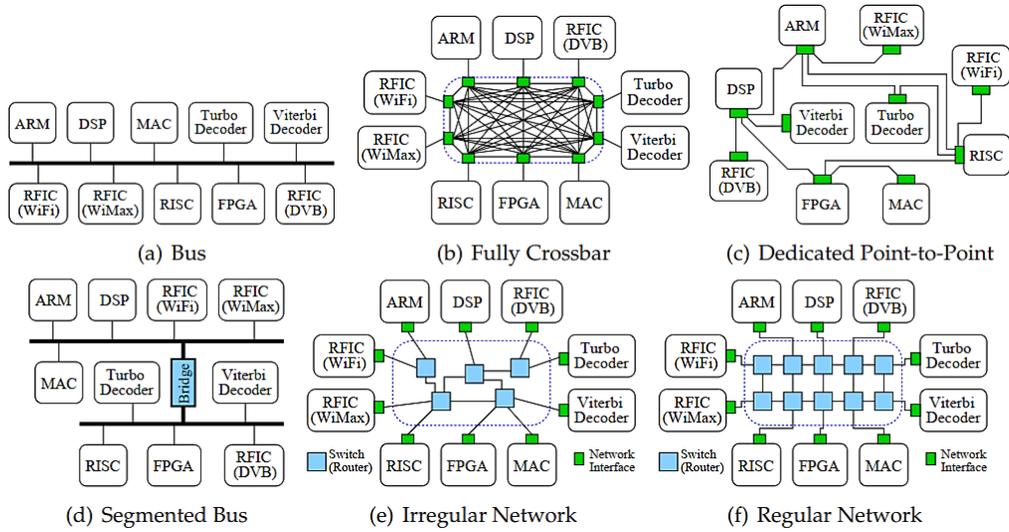
Network on Chip, Router, XY routing algorithm, OE routing algorithm, DyAD routing algorithm, Negative First routing algorithm, West First routing algorithm, North Last routing algorithm, DyXY routing algorithm, Performance metrics, Turn Model, NIRGAM.

1- المقدمة:

يواكب التطور المستمر للرقاقات (الشرائح) الصغيرة (Microchip) خاصة تناقص حجم عناصر المعالجة الالكترونية بحيث يتوقع تضاعف عدد العناصر على الشريحة الواحدة بمعدل مرة في كل سنتين. وبالرغم من استمرار هذا التطور، إلا أن التقدم على مستوى النظام يسير في خطوات، حيث تُحدد النقلة النوعية عند تبلور الافكار والاقتراحات. ومن هنا ظهر مفهوم الـ SoC، الذي فتح مجالاً واسعاً للتطبيقات ولاستخدام المعالجة المتوازية واسعة النطاق والعمليات المترابطة بإحكام، ولتبي بعضاً من متطلبات الزمن الحقيقي [1].

وبشكل عام يتألف الـ SoC من بعض عناصر المعالجة (Intellectual Properties (IPs))، وبعض الذاكر (Memories) ووحدات دخل و خرج I/O. وخلال السنوات الماضية زادت وتيرة العمل لأنظمة SoC من أجل تحسين أداء هذا النظام حيث انتقل نموذج بنية SoC من عنصر معالجة واحد إلى عناصر معالجة متعددة و هو ما يسمى بنظام SoC متعدد المعالجات (multiprocessor SoC (MPSoC) [2].

ولأن مشاكل الاتصال بين مختلف المكونات تؤثر بشكل أساسي على أداء الرقاقة كذلك على الطاقة المستهلكة، فقد أصبح العمل على تطوير تقنية الاتصال البيني للشريحة ذو أهمية كبيرة بالنسبة للباحثين ومصممي البرمجيات [3]. فكان اختيار الـ NoC لأنه يعتبر النموذج الأفضل عندما يكون عدد النوى أكثر من عشرة. وبالتالي فإن بنية الاتصالات المتطورة باتت ضرورة ملحة لتبادل المعلومات داخل الرقاقة بدلاً عن البنى التقليدية الموضحة بالشكل (1). حيث تعتبر المشكلة الأساسية لاستخدام الناقل Bus ما تعرف بعنق الزجاجة (bottleneck) بسبب محدودية النطاق الترددي. واستخدام نظام التوصيل (Full Crossbar) أدى لتداخل كهرومغناطيسي عالٍ ومشاكل في سعة التوصيل وذلك بسبب هيمنة الأسلاك المعدنية. أما مشكلة الناقل المخصص من نقطة لنقطة (dedicated point-to-point) فكانت ضعف المرونة [1]. يعتبر الـ NoC هو الحل الأمثل لكل هذه المشاكل والمتطلبات. يظهر في الشكل (1) (F) و (1) (E) بنى طوبولوجيات NoC منتظمة وغير منتظمة على الترتيب.



الشكل (1): البنية التحتية للاتصالات البينية في SOC.

2- هدف البحث:

يهدف البحث إلى التعريف بمفهوم الـ NoC و خوارزميات التوجيه المختلفة والأكثر استخداماً، مثل DyXY, XY, OE, NF, WF, NL, DyAD، حيث تتميز هذه الخوارزميات باشتراكها بخاصية خلوها من الجمود (Deadlock free). كما قمنا بإجراء مقارنة بين مختلف الخوارزميات المذكورة من أجل تقييم أداء وفعالية استخدامها في مختلف الأنظمة.

3- مواد وطرق البحث:

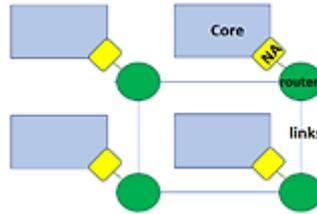
تم تنفيذ المحاكاة باستخدام برنامج NIRGAM version 2.1 وهو وحدة محاكاة مميزة و دقيقة تستهدف الأبحاث المتعلقة بالـ NoC وخوارزميات التوجيه وتطبيقاتها. تم إجراء المحاكاة على شبكة 2D-mesh بشروط حركية ذات معدل البت الثابت Constant Bit Rate (CBR) لمقارنة تأثير متغيرات حمولة الحركية على متوسط زمن الاستجابة، متوسط الإنتاجية والاستهلاك الكلي للطاقة في الشبكة بالنسبة لخوارزميات التوجيه المدروسة.

4- مفهوم NoC:

بدايةً من الضروري لنا أن نستوضح أكثر عن مفهوم الـ NoC والذي تم تقسيمه إلى عدة مبادئ أساسية:

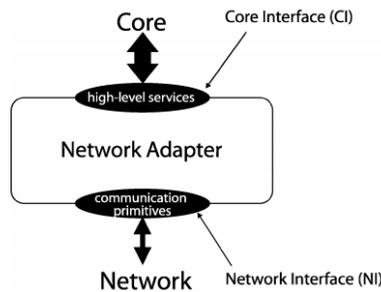
1-4 معمارية NoC (NoC Architecture):

كما هو مبين في الشكل (2) يتكون نموذج الـ NoC يتألف بشكل أساسي من:



الشكل (2): المكونات الأساسية لـ NoC

- الموجّه (Router): يوجه البيانات وفقاً لبروتوكولات محددة. ويشمل خوارزميات التوجيه.
- محوّل الشبكة: (Network Adapters (NA)) يمثل الجسر الواصل بين الموجّه والعناصر المتصلة به. مهمته الأساسية هي فصل عملية المعالجة في النوى (IPs) عن عملية الاتصال في الشبكة. ويشمل عمليتان هما بروتوكول التحويل وتشكيل الحزم (الرزق). كما هو موضح بالشكل (3).

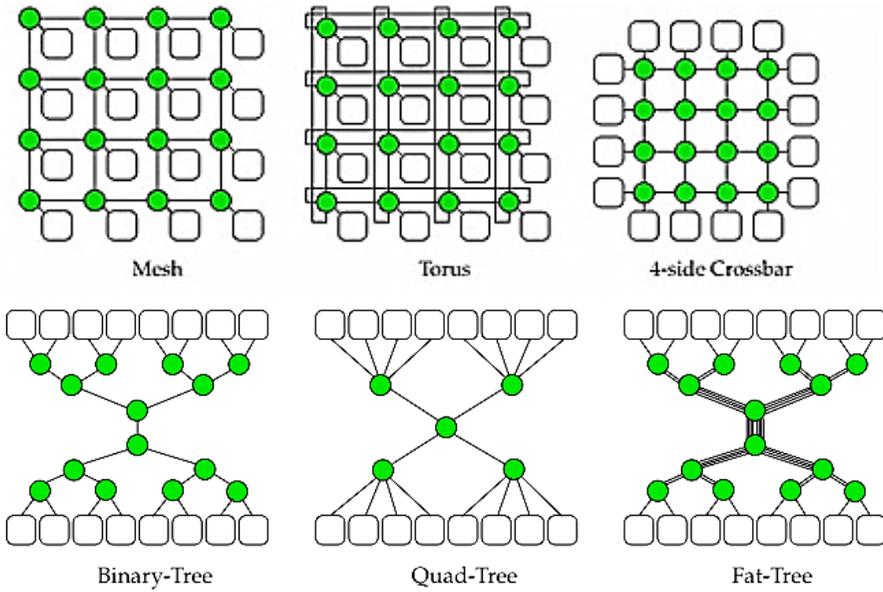


الشكل (3): (Network Adapters) في NoC

- الوصلات (Connections): وهي قنوات توصيل البيانات بين العناصر المختلفة للشبكة [4].

4-2 هيكلية الشبكة (Topology):

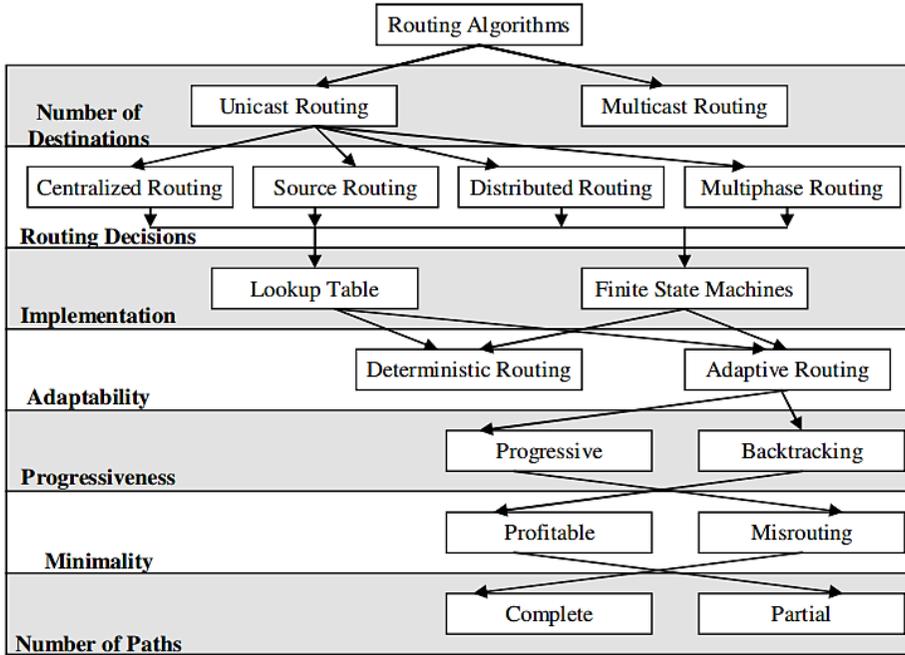
وهي الطريقة التي يتم فيها تنظيم الموجهات و NA والتوصيلات (Connections). تقسم إلى طوبولوجيات منتظمة (mesh, mesh torus, ring, fat-tree,.. ect) وغير منتظمة موضحة بالشكل (4).



الشكل (4): بعض طوبولوجيات NoC.

4-3 التوجيه (Routing):

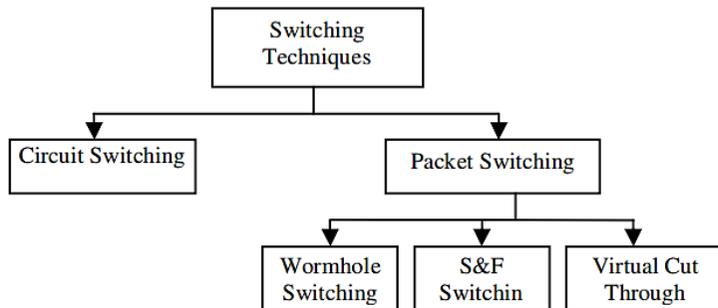
وهي عملية توجيه البيانات من المصدر إلى الوجهة وفق استراتيجيات محددة. بشكل عام يتم تصنيف خوارزميات التوجيه وفقاً لعدة معايير كما هو موضح بالمخطط في الشكل (5)، والتصنيف الذي تم اعتماده في هذه المقالة لتمييز خوارزميات التوجيه هو تكيف الخوارزمية مع حالة الشبكة (adaptability) [5].



الشكل (5): خوارزميات التوجيه في NOC وتصنيفاتها.

4-4 تقنيات الإبدال (Switching Techniques):

المهمة الأساسية لتقنيات الإبدال (وتسمى ببعض المراجع أنماط التوجيه) والموضحة تصنيفاتها الأساسية بالشكل (6)، هي تحديد متى وكيف يتم وصل مدخلات الراوتر بمخارجه. وتوجد العديد من تقنيات الإبدال بينها: store-and-forward, virtual cut-through and wormhole [6].



الشكل (6): تقنيات الإبدال في NOC.

5 – متطلبات الأداء في NoC (Performance Requirements):

لا بد أن يحقق أي نموذج مصمّم من الـ NoC كوكبة من متطلبات الأداء ليكون تصميمًا جيدًا وتتخلص بما يلي:

- زمن استجابة صغير (Small latency).
- إنتاجية عالية (Guaranteed throughput).
- تقسيم المسار (Path diversity).
- سعة نقل جيدة (Sufficient transfer capacity).
- استهلاك قليل للطاقة (Low power consumption).
- سماحية الخطأ والتشتت (Fault and distraction tolerance).
- المعمارية القابلة للتوسّع والبرمجة (Architectural requirements of scalability)
(and programmability).

وفي بحثنا هذا تم اعتماد ثلاث بارامترات من أجل تقييم الأداء، هي (زمن استجابة الشبكة (بمعنى آخر تأخير الشبكة)، إنتاجية الشبكة واستهلاك الطاقة الكلي في الشبكة):

1- زمن استجابة الشبكة (Network Latency): هي الزمن من لحظة تشكيل (head flit) في المصدر لحين استقبال آخر (tail flit) في الوجهة. ولتكن L_{ij} هي استجابة الرزمة z و N_i هو عدد الرزم التي تم استقبالها من خلال المعالج i (بعد عملية التهيئة warm-up). حيث N هو عدد المعالجات في الشريحة، يحسب معدل استجابة الشبكة كالتالي:

$$Average\ Network\ Latency = L_{avg} = \left(\frac{1}{N}\right) \sum \left(\frac{1}{N_i \sum L_{ij}}\right) \dots \dots (1)$$

for $i = 1, 2, \dots, N$ and for all j

2- إنتاجية الشبكة (Network Throughput): تعرّف على أنها معدل نجاح الشبكة بقبول وتوصيل الرزم المحقونة فيها. ولتكن T_{sim} و T_{warm} هما زمن المحاكاة وزمن تهيئة الاستقبال على الترتيب.

3- معدل إنتاجية الشبكة (Average Network Throughput) (رزمة في واحدة الزمن لكل عقدة (in packets per unit time per node) يعطى كما يلي:

$$T_{avg} = \frac{1}{N(T_{sim} - T_{warm}) \sum N_i} \dots \dots (2)$$

where $i = 1, 2, \dots, N$

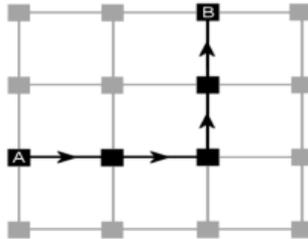
إن تخمين استهلاك الطاقة الكلي للشبكة يعتمد على العمليات القائمة في كل المكونات عند تشغيل نمط حركية معين. ولا بد أن يكون قليل لكل ال NoC.

6- خوارزميات التوجيه (Routing Algorithms):

6-1 خوارزميات التوجيه المحددة (Deterministic Routing Algorithm):

تولّد خوارزميات التوجيه المحددة (Deterministic) دوماً نفس مسار التوجيه بين نفس المصدر والوجهة. وغالباً يكون أقصر مسار بينهما حيث تستخدم عنوان العقدة الحالية وعنوان الوجهة لحساب هذا المسار. ولأن الرزم تستخدم نفس المسار بين نفس عقدتي المصدر والوجهة، فلا يمكنها استخدام مسارات بديلة لتجنب حدوث الازدحام. من أكثر خوارزميات التوجيه المحددة استخداماً هي خوارزمية XY Routing [4].

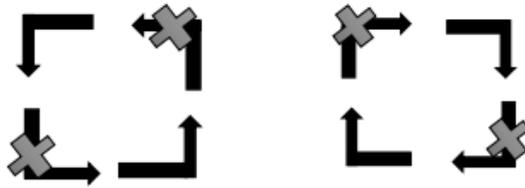
خوارزمية (XY Routing): يتم تطبيق هذه الخوارزمية من أجل مختلف أنواع الطوبولوجيا المنتظمة وغير المنتظمة. وتدعى (Dimension order routing DOR). وهي تتبع لمفهوم (minimal turning routing). في هذه الخوارزمية يتم تعريف كل موجه من ال NoC من خلال المؤشرين (x, y) للعقدة التابع لها في شبكة 2D-mesh. وفقاً لهذه الخوارزمية ترسل البيانات وفق المحور X باتجاه العمود الذي توجد فيه عقدة الوجهة (الموجه الخاص بها). ومن ثم يتم ارسالها وفق المحور Y وبذلك تصل إلى عقدة الوجهة. حركة البيانات في هذه الخوارزمية تظهر في الشكل (7).



الشكل (7) خوارزمية التوجيه XY

ومن هنا جاءت تسميتها بخوارزمية XY كون البيانات تتحرك وفق المحور X أولاً ثم وفق المحور Y. ولأن بعض الانتقالات تمنع في هذه الخوارزمية، الشكل (8)، فهي من تلقاء نفسها أصبحت خالية من الجمود (deadlock) [7].

وفقاً لهذه الخوارزمية يتم مقارنة عنوان الموجّه الحالي (C_x, C_y) مع عنوان الموجّه الهدف (عقدة الوجهة) (D_x, D_y) والذي يتواجد في ترويسة الـ flit. وتذهب الـ flit إلى منفذ الموجّه الذي يحمل نفس عنوان الوجهة أي عند تساوي العنوانين (D_x, D_y) و (C_x, C_y) . وتتخلص الخوارزمية بالشكل التالي:



الشكل (8): الانتقالات المسموحة في خوارزمية XY.

- إذا لم يتساو العنوانان، يتم بدايةً مقارنة C_x مع D_x (أي يتم توجيهه وفق المحور الأفقي أولاً):

- عندما $C_x > D_x$ تتوجه الـ flits إلى المنفذ WEST في الموجّه الحالي.
- عندما $C_x < D_x$ تتوجه الـ flits إلى المنفذ EAST في الموجّه الحالي.
- عندما $C_x = D_x$ أي أن الـ flits في الموقع الصحيح من المحور الأفقي لشبكة الـ mesh ويتم توجيهها الآن وفق المحور الشاقولي.

يتم مقارنة C_y مع D_y :

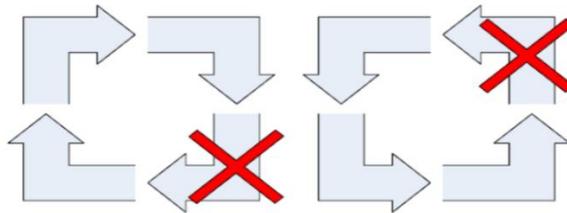
- عندما $C_y > D_y$ تتوجه الـ flits إلى المنفذ NORTH في الموجّه الحالي.
- عندما $C_y < D_y$ تتوجه الـ flits إلى المنفذ SOUTH في الموجّه الحالي.
- عندما $C_y = D_y$ أي أن الـ flits أصبحت في عقدة الوجهة [8].

2-6 خوارزميات التوجيه المعتمدة على (Turn Model):

خوارزميات التوجيه Turn Model [9] تحدّد الحد الأدنى من الانتقالات (الالتفافات) اللازمة للتخلص من حالة الـ(Deadlock). مع المحافظة على بعض خاصيات تنوع المسار وإمكانية التكيّف. في التوجيه بترتيب البعد (Dimension Order Routing) فقط أربع التفافات (انتقالات) ممكنة من أصل 8 التفافات متاحة في شبكات 2D-mesh. أما خوارزميات (Turn model routing) تزيد من مرونة الشبكة وذلك بزيادة عدد الالتفافات المسموحة لتصبح 6 من أصل 8. أي يتم منع التفاف واحد فقط من كل دورة. تعتبر هذه الخوارزميات جزئية التكيّف يتم حساب أكثر من مسار بين المصدر والوجهة فيها. لكن بناءً على قيود الاختناق في الشبكة سيتم اختيار مسار واحد فقط للتوجيه. وأيضاً الخاصية المشتركة لهذه الخوارزميات هي خلوها من (Deadlock)، حيث تعمل على إلغاء الحافة اليمنى من الحلقة (الدائرة) المسببة لحالة الـ (Deadlock).

1-2-6 خوارزمية التوجيه West First:

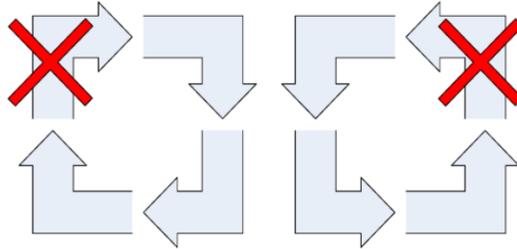
هي خوارزمية توجيه جزئية التكيّف (Partially Adaptive Routing Algorithm). تطبق قيود على مسارين في كل عقدة. مثلاً الالتفاف من South إلى West ومن الـ North إلى West. أي أن الرزم لا يمكنها الانتقال من المنفذ South إلى المنفذ West أو من المنفذ North إلى West، كما هو مبين في الشكل (9). ووفقاً لهذه الخوارزمية الرزم يجب أن تبدأ من الاتجاه الغربي West (عند الضرورة) قبل الانتقال إلى باقي الاتجاهات. بعد الانتقال للـ West يمكن توجيهها بشكل متكيّف إلى باقي الاتجاهات South، East و North. ولا يمكن تسيير الرزمة لاحقاً باتجاه الغرب West بسبب قيود التوجيه الي تفرضها الخوارزمية [9].



الشكل (9): الالتفافات المسموحة في خوارزمية (West First).

6-2-2 خوارزمية التوجيه North Last:

هي خوارزمية توجيه جزئية التكيّف. في شبكات Mesh يوجد مساري توجيه مقيدين في كل عقدة مثلاً من North إلى West و من North إلى East. الرزم لا تستطيع الانتقال من المنفذ North إلى المنفذ West أو من المنفذ North إلى المنفذ East كما هو موضح بالشكل (10). وفقاً لهذه الخوارزمية الرسالة ستوجه إلى المنفذ الشمالي North فقط في حال كانت آخر اتجاه في مسارها. أي متى ما تم توجيه الرسالة للمنفذ North لا يمكن توجيهها بأي اتجاه آخر بعدها، وبالتالي الانتقال للـ North لا بد أن يكون آخر انتقال ضمن المسار المحدد. في هذه الخوارزمية يتم توجيه الرزم بشكل متكيّف للاتجاهات West، South و East وفي النهاية توجه للـ North [9].

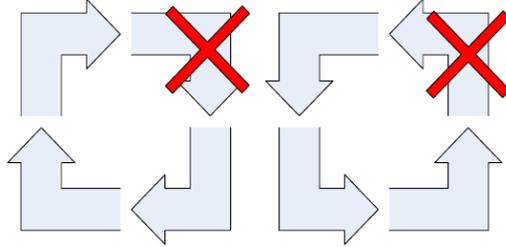


الشكل (10): الالتفافات المسموحة في خوارزمية (LAST NORTH).

6-2-3 خوارزمية التوجيه (Negative First):

هي خوارزمية توجيه جزئية التكيّف. في شبكات Mesh يوجد مساري توجيه مقيدين في كل عقدة، مثلاً الانتقالات من North إلى West ومن East إلى South. أي أن الرزم لا يمكنها الانتقال من المنفذ North إلى المنفذ West ومن المنفذ East إلى المنفذ South للعقدة كما هو واضح في الشكل (11). ووفقاً لهذه الخوارزمية لا يمكن للرسائل ان تنتقل من الاتجاه الموجب إلى الاتجاه السالب باعتبار أن الـ North و East اتجاهات موجبة والـ South و West هي اتجاهات سالبة. لذلك تنتقل الرسائل في الاتجاهات السالبة (South & West) في البداية قبل أن يسمح لها بالانتقال في الاتجاهات الموجبة (North & East). في هذه الخوارزمية توجه الرزم بشكل متكيّف في الاتجاهات السالبة (West & South)

ومن ثم توجه في الاتجاهات الموجبة. هذه الخوارزمية يمكن أن تكون Minimal أو Non-Minimal. لكن النسخة الـ Non-Minimal هي الأكثر تكيفاً وتسامحاً مع الأخطاء [9].



الشكل (11): الالتفافات المتاحة في خوارزمية (Negative First).

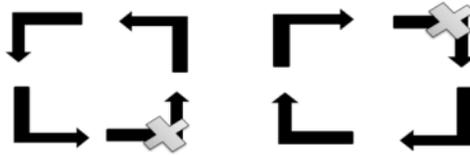
6-2-4 خوارزمية التوجيه OE Routing (Odd-Even):

يتم حساب أكثر من مسار توجيه بين المصدر والوجهة في خوارزميات التوجيه المتكيفة و الخيار يقع على مسار واحد تبعاً لشروط الازدحام في الشبكة. وهذه المسارات تتغير دائماً وفقاً للتغيرات الديناميكية لحالة الازدحام في الشبكة. خوارزمية التوجيه OE (Odd-Even Routing algorithm). تتدرج تحت تصنيف خوارزميات التوجيه التوزيعية المتكيفة (distributed adaptive routing). وهو قائم على التفاف Odd-Even. ولأن هذه الخوارزمية تقدم العديد من قيود الانتقال فهي خالية بشكل تلقائي من الـ (Deadlock). Odd-Even Turn Model لا تحتاج لأية قناة فرعية في طوبولوجية 2D mesh. تمثل كل عقدة في طوبولوجية 2D mesh بمؤشراتها (x,y)، وفقاً لهذه الخوارزمية إذا كان البعد x للعقدة رقم زوجي (even) عندها يعتبر هذه العמוד هو عמוד زوجي وفي حال كان مؤشر الـ x للعقدة فردي فيعتبر العמוד عندئذ عמוד فردي. الالتفاف (turn) يعرف على أنه تغيير اتجاه الانتقال بمقدار 90 درجة. وفقاً لذلك لدينا 8 احتمالات للانتقالات (الالتفافات) عند كل انتقال. الانتقال ES يعرف على أنه انتقال (turn) فقط عندما يكون التغيير في الاتجاه من الشرق (EAST) للجنوب (SOUTH). WS يعرف على أنه انتقال (turn) فقط عندما يكون التغيير في الاتجاه من الغرب (WEST) للجنوب (SOUTH). وبنفس الطريقة تعرف الانتقالات EN, WN, SE, SW, NE, NW و حيث N,S,W,E تمثل على الترتيب

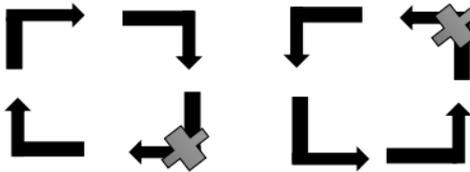
الشمال، الجنوب، الغرب و الشرق. وفقاً لخوارزمية التوجيه OE يجب اتباع النظريات التالية لتجنب حدوث Deadlock [10].

النظرية 1: اذا كانت العقدة متمثلة بعامود زوجي لا يمكن للرزم أن تقوم فيها الانتقالات EN كما هو مبين في الشكل (12) و اذا كانت العقدة متمثلة بعامود فردي لا يمكن للرزم أن تقوم بالانتقال NW كما هو واضح في الشكل (13).

النظرية 2: اذا كانت العقدة متمثلة بعامود زوجي لا يمكن للرزم أن تقوم فيها الانتقالات ES كما هو مبين في الشكل (12) و اذا كانت العقدة متمثلة بعامود فردي لا يمكن للرزم أن تقوم بالانتقال SW كما هو واضح في الشكل (13).



الشكل (12): الانتقالات الممكنة للأعمدة الزوجية في خوارزمية التوجيه OE.



الشكل (13): الانتقالات الممكنة للأعمدة الفردية في خوارزمية التوجيه OE.

3-6 خوارزميات التوجيه المتكيفة (Adaptive Routing Algorithms):

لا تجبر هذه الخوارزميات الرزمة بمسار واحد فقط من المصدر للوجهة، فعند حساب التوجيه يتم الأخذ بعين الاعتبار الحالة الحالية للشبكة. هذا ما يجعل عملية التوجيه أكثر مرونة ويقلل من وقت الانتظار غير الضروري و بالتالي يوفر تسامح أكبر مع الأخطاء.

1-3-6 خوارزمية التوجيه الديناميكية DyAD :

وهي إحدى خوارزميات التوجيه الذكية. وهي ديناميكية بتكوينها. تجمع بين ميزات خوارزميات التوجيه المحددة (deterministic) والمتكيفة (adaptive). حيث تتميز خوارزميات التوجيه المحددة أنها ذات استجابة سريعة عند وجود معدلات ازدحام منخفضة وتصميم الموجّه فيه

بسيط. أما خوارزميات التوجيه المتكيفة تتميز بتجنبها للوصلات المزدحمة في الشبكة وبذلك تحقق إنتاجية عالية. في حالات الازدحام المنخفضة للشبكة لا يكون أداء خوارزميات التوجيه المتكيفة مرضي. وستؤدي لتأخير كبير ناتج عن عمليات التحكم الإضافية. خوارزمية التوجيه DyAD تتبدل بين المتكيفة والمحددة وفقاً لحالة الازدحام في الشبكة. في DyAD كل موجة في الشبكة وبشكل مستمر يقوم بقياس الازدحام. يتم حساب قيمة الازدحام لكل الموجّهات المجاورة ويتم اتخاذ قرار التوجيه اعتماداً على هذه القيم الآتية. يعمل موجة DyAD بوظيفة موجة ثابت (محدد) عندما تكون قيم الازدحام منخفضة. وبالتالي سيستفيد من ميزات التأخير المنخفض في هذا النوع من الموجّهات. ويعمل الموجّه DyAD في نمط التوجيه المتكيف عندما يكون مستوى الازدحام عالٍ. وبالتالي نحصل على ميزات تجنب الوصلات المزدحمة عبر استكشاف مسار التوجيه، وهذا يقودنا لإنتاجية عالية في الشبكة وهو أمر مرغوب به في التطبيقات المستخدمة لـ NoC. ويتم تجنب Deadlock و Livelock عند الدمج بين نمطي التكيف و التحديد في NoC.

4-6 خوارزمية التوجيه Dynamic XY:

كما ناقشنا سابقاً أن خوارزميات التوجيه المحددة لها بعض الإيجابيات من بساطة تصميم الموجّه وتدرج قيمة الإنتاجية عند زيادة نسبة حقن الرزم. ولذلك تصنف خوارزمية التوجيه XY على أنها مدركة للازدحام بطبيعتها وخالية أيضاً من (Deadlock). وقد ثبت أن التكيف يقلل من عمليات تكوين عقد الذروة (Hotspot Node Formation) وتجنب أخطاء المكونات. ويمكن اكتساب التكيف في الشبكة من خلال مراقبة مستويات الاختناق بشكل مستمر. يتم الوصول على خاصيتي (Deadlock-Free) و (Livelock-Free) من خلال إضافة بعض القيود على التوجيه أو اختيار المسار الأقصر بين المصدر والوجهة. وصف الخوارزمية:

1- يتم قراءة عنوان الموجّه الهدف من الرزمة القادمة للموجه الحالي.

2- مقارنة عنوان الموجّه الهدف مع عنوان الموجّه الحالي:

في حال تتطابق العناوين، يتم إرسال الرزمة على المنفذ المحلي local الخاص بالموجه. أما إذا كان عنوان الموجّه الهدف له نفس عنوان المؤشر X (أو نفس قيمة المؤشر Y) للموجه

الحالي ، ترسل الرزمة إلى الموجّه المجاور الذي له نفس قيمة الـ y (أو نفس قيمة الـ x) باتجاه الموجّه الهدف. وإلا يتم فحص قيمة الـ stress للموجهات المجاورة للموجه الحالي، و ترسل الرزمة للموجه ذو القيمة الأقل [11].

قيمة الـ stress هي بارمتر يمثل شروط الاختناق في الموجّه، والتي تتمثل بعدد الخلايا المشغولة في بفرات (مسجلات) (Buffers) الدخل. كل قيمة لـ stress تحدّث اعتماداً على آلية Event-Driver.

7 - تحليل أداء خوارزميات التوجيه (XY-OE-DyAD):

7-1 المعطيات التجريبية للمحاكاة:

تم إجراء المحاكاة باستخدام الـ (NoC Interconnect Routing and Applications) لمقارنة أداء خوارزميات التوجيه المحددة XY ، المتكيفة OE و الخوارزمية الناتجة عن دمجها DyAD . مقاييس الأداء المعتمدة هي (معدل زمن الاستجابة، معدل الإنتاجية واستهلاك الطاقة الكلي للشبكة) وذلك من أجل المعطيات المبينة بالجدول (1). تم اعتماد هذه المعطيات كونها بارمترات قياسية معتمدة في جميع الأبحاث التي تقيم أداء خوارزميات التوجيه في شبكات NoC.

الجدول (1) المعطيات التجريبية لمحاكاة خوارزميات التوجيه XY, OE, DYAD

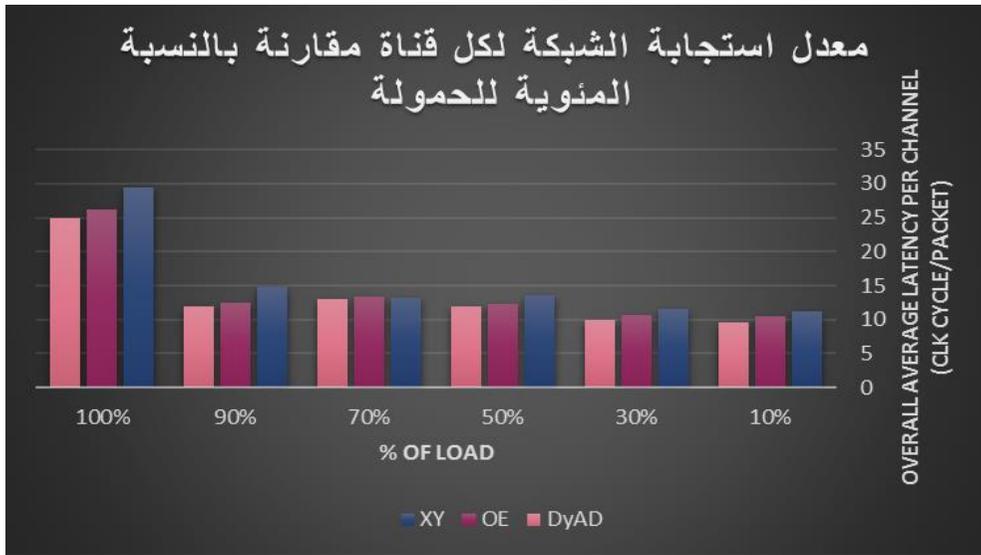
3 X 3 mesh	طوبولوجيا الشبكة (topology)
CBR(Constant Bit Rate)_12 Gbps	مولد الحركة (traffic generator)
FIFO(first input first output) is 32	عمق البفرات(المسجلات) في قناة الدخل (عدد البفرات)(Buffer depth of input channel)
4	عدد القنوات الافتراضية في القناة الفيزيائية (Number of virtual channels per physical channel)
3 um(unit meter)	طول الوصلة (Link length)
20_bytes	حجم الرزمة (Packet size)
2 clock cycles	الفاصل الزمني بين الـ flit (flit interval)
1 GHz	تردد الساعة (Clock frequency)
800 clock cycles	زمن التهيئة (warm-up time)

50000 clock cycles

زمن المحاكاة (Simulation time)

7-2 نتائج المحاكاة:

تم الحصول على نتائج المحاكاة بناءً على الشروط التجريبية السابقة وذلك من أجل معدل زمن الاستجابة (average latency)، معدل الإنتاجية (average throughput) بالإضافة إلى استطاعة الكلية للشبكة (total network power) و ذلك بالمقارنة مع النسبة المئوية للحمولة في نمط الحركة العشوائي.



الشكل (14): معدل زمن الاستجابة لكل قناة مقارنة بالنسبة المئوية للحمولة

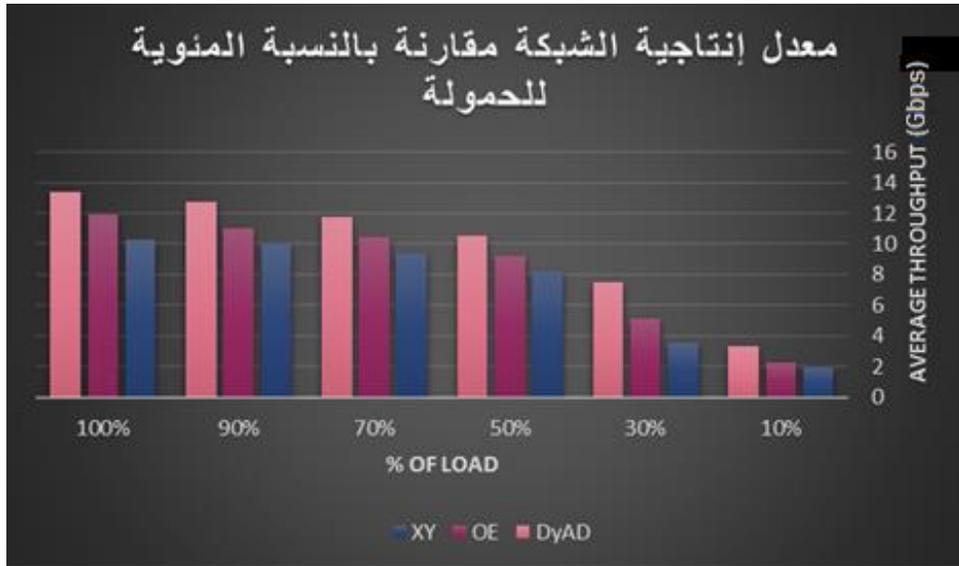
يبين الشكل (14) الرسم البياني لمعدل زمن استجابة الشبكة لكل قناة (/ clkcycle packet) من أجل خوارزميات التوجيه XY, OE, DyAD. يظهر فيه تقارب قيم زمن الاستجابة في الحمولات المنخفضة بين خوارزميتي التوجيه OE,XY بينما زمن الاستجابة في خوارزمية DyAD كان الأفضل عند النسب المنخفضة للحمولة. يزداد التأخير في خوارزمية XY مع زيادة نسبة الحمولة وذلك بسبب عدم قدرتها على اختيار المسارات الأقل ازدحاماً، بينما تتقارب معدلات زمن الاستجابة بين OE, DyAD عند الحمولات المتوسطة والعالية، وذلك لأن خوارزمية DyAD تعمل عمل خوارزمية OE في المسارات الأكثر ازدحاماً، مع تفوق واضح لخوارزمية DyAD في معدل زمن الاستجابة بسبب ديناميكية عملها.

الشكل (15) يبين استهلاك الطاقة الكلي للشبكة مقارنة بالنسبة المئوية للحمولة من أجل خوارزميات التوجيه XY, OE, DyAD. إن استهلاك الطاقة الكلي للشبكة كان كبير لخوارزمية OE وخاصة في النسب العالية من الحمل والمتوسطة منها. و تتقارب قيم الطاقة المستهلكة بالنسبة لخوارزميتي التوجيه XY, DyAD عند النسبة المنخفضة للحمولة ولكن بزيادة هذه النسبة يزداد الاستهلاك بشكل كبير في خوارزمية XY. مع بقاء الاستهلاك مقبول في خوارزمية التوجيه DyAD كونها تقلل من زمن الانتظار لاختيارها الخوارزمية المناسبة في كل حالة من حالات الشبكة، وبالتالي استهلاك الموارد يكون فيها أقل كالبفرات (buffers).



الشكل (15): استهلاك الطاقة الكلي للشبكة مقارنة بالنسبة المئوية للحمولة

يبين الشكل (16) معدل إنتاجية الشبكة (Gbps) لكل من الخوارزميات XY, OE و DyAD بتغير النسبة المئوية للحمولة، يظهر بوضوح هيمنة خوارزمية التوجيه OE على قرينتها الـ XY كونها تعمل على توزيع الحمل بشكل أكبر وأقل تأخير بتوصيل الرزم في الحملات المتوسطة و العالية. لكن خوارزمية التوجيه DYAD تفوقت بشكل واضح على خوارزميتي التوجيه OE و XY في معدل الإنتاجية و خاصة عند زيادة نسب الحمل،



الشكل (16): معدل الإنتاجية مقارنة بالنسبة المئوية للحمولة

وذلك لاستغلالها الأمثل لكل حالات الشبكة سواءً بساطة وسرعة العمل بخوارزمية XY في الحمولات المنخفضة وفعالية العمل بخوارزمية OE في الحمولات العالية. مقياس الأداء (P): هي نسبة معدل الإنتاجية على معدل زمن الاستجابة. وتكون قيمة الـ P الأعلى للخوارزمية ذات الأداء الأفضل.

$$P = \text{Performance Metrics (Per channel basis)} = \text{Average Throughput/Average Latency} \dots \dots \dots (3)$$

الجدول (2) قيم زمن الاستجابة و معدل الإنتاجية لخوارزميات (XY,OE,DYAD) من أجل نسبة حمولة 50%

خوارزمية التوجيه	Average Throughput	Average Latency
XY	8.198	13.5859
OE	9.2098	12.3141
DYAD	10.5469	11.9326

من خلال النتائج المبينة في الجدول (2) نستطيع حساب قيمة (P) كما يلي:

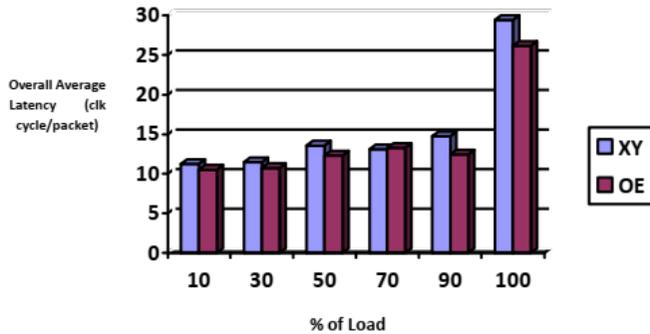
XY Routing (50% Load) $P = (8.198/13.5859) = 0.6034$

OE Routing (50% Load) $P = (9.2098/12.3141) = 0.7479$

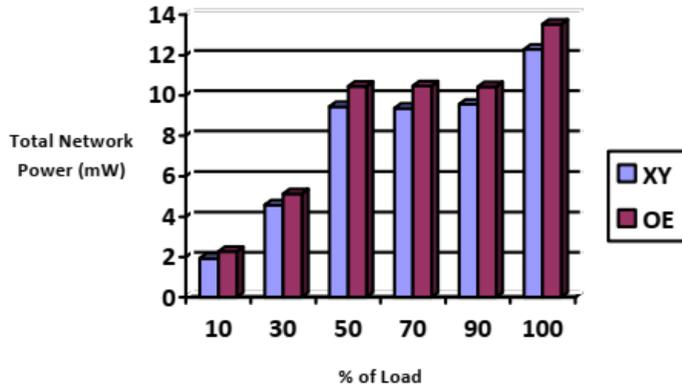
DyAD Routing (50% Load) $P = (10.5469/11.9326) = 0.8836$

وبالتالي نجد أن الدمج بين خوارزميتي التوجيه XY و OE أعطى نتائج جيدة من ناحية الإنتاجية والاستجابة كونها تعمل على الاستغلال الأمثل لموارد الشبكة بناءً على شروط الازدحام فيها.

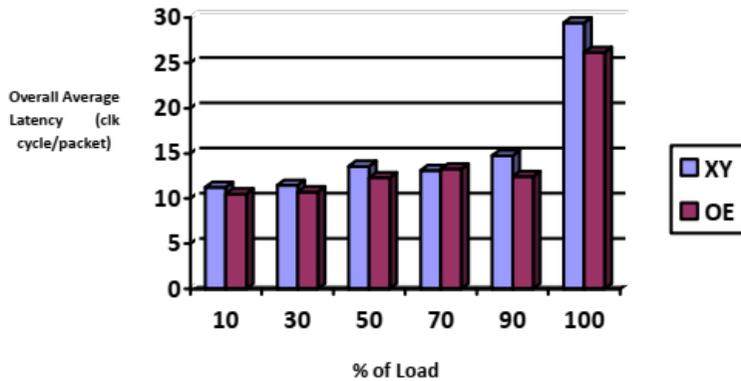
قمنا بمقارنة النتائج التي حصلنا عليها في هذه المحاكاة مع النتائج التي قُدمت في العمل [13]، والتي تستهدف خوارزميات التوجيه XY و OE حيث تمت المحاكاة باستخدام NIRGAM من أجل نفس البارامترات التي قمنا باستخدامها و المبينة في الجدول (1)، تم قياس أداء الخوارزميتين من أجل معدل زمن تأخير الاستجابة (المبيّن بالشكل (17))، الاستطاعة المستهولة (المبيّنة بالشكل (18)) و معدل الإنتاجية (المبيّن بالشكل (19)) من أجل تغيرات نسبة الحمولة، ومن خلال مقارنة الشكل (14) مع الشكل (17)، الشكل (15) مع (18)، وأيضاً الشكل (16) و (17). نلاحظ تقارب القيم في المنحنيات التي حصلنا عليها في دراستنا والقيم التي تم عرضها في المرجع المدروس.



الشكل (17): معدل زمن الاستجابة لكل قناة مقارنة بالنسبة المئوية للحمولة في العمل [13].



الشكل (18): استهلاك الطاقة الكلي للشبكة مقارنة بالنسبة المئوية للحمولة للعمل
[13].



الشكل (19): معدل الإنتاجية مقارنة بالنسبة المئوية للحمولة [13].

8- تحليل أداء خوارزميات التوجيه (XY,OE,WF,NL,NF,DyXY):

في هذا القسم سوف نناقش أداء مختلف خوارزميات التوجيه المحددة والمتكيفة بالإضافة للخوارزميات جزئية التكيف والتي تشترك مع بعضها بميزة خلوها من (deadlock). و هذه الخوارزميات هي XY (a deterministic DOR routing) و خوارزمية OE (Turn West First, North Last, Negative First, (model based adaptive routing minimal) DyXY، و خوارزمية (Turn model based partially adaptive routing)، و بعدها سنقوم بمحاكاتها على برنامج NIRGAM ومقارنة أدائها وذلك خلال تغير نسبة الحمولة.

8-1 المعطيات التجريبية للمحاكاة:

في الجدول (3) تم تحديد البارامترات المعتمدة في هذه المحاكاة للمقارنة بين خوارزميات التوجيه السابقة وتقييم أدائها. تم زيادة أبعاد الشبكة المدروسة لإعطاء نتائج أشمل مع زيادة عدد الخوارزميات التي تتم مقارنتها.

الجدول (3): بارامترات المحاكاة التي يتم فيها تقييم أداء خوارزميات

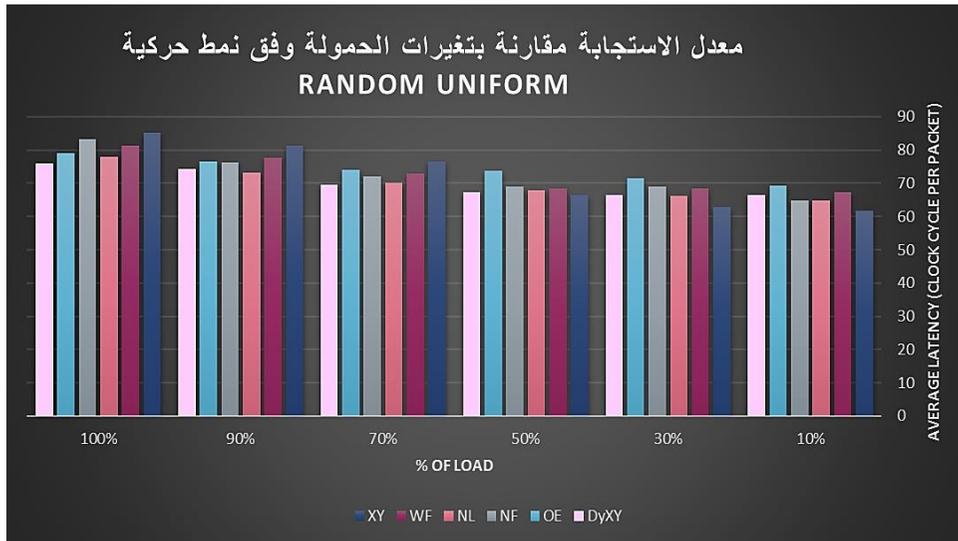
. XY,OE,WF,NL,NF,DYXY

4x4 mesh	طوبولوجيا الشبكة (topology)
CBR(Constant Bit Rate)_32 Gbps	مولد الحركية (traffic generator)
FIFO is 32	عمق البفرات في قناة الدخل (عدد البفرات) (Buffer depth of input channel)
4	عدد القنوات الافتراضية في القناة الفيزيائية (Number of virtual channels per physical channel)
3 um	طول الوصلة (Link length)
20_bytes	حجم الرزمة (Packet size)
2 clock cycles	الفاصل الزمني بين الفليت (flit interval)
1 GHz	تردد الساعة (Clock frequency)
800 clock cycles	زمن التهيئة (warm-up time)
50000 clock cycles	زمن المحاكاة (Simulation time)

وتتم المحاكاة وفقاً لتغير نسبة الحمولة المثوية.

2-8 نتائج المحاكاة:

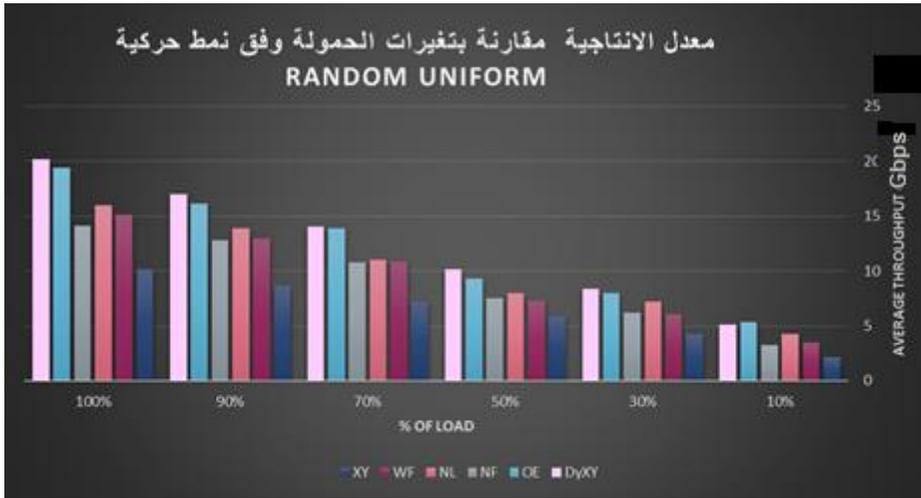
قمنا بإجراء المحاكاة وفقاً للبارامترات السابقة مقارنة مع تغيرات الحمولة مأخوذة بالنسبة المئوية. من الشكل (20) والذي يبين معدل زمن الاستجابة للخوارزميات المختلفة، نلاحظ انخفاض معدل زمن الاستجابة عند خوارزمية XY في نسب الحمولة المنخفضة، تليها خوارزميات التوجيه NL و NF بينما كانت خوارزميات التوجيه DyXY ، OE و WF هي الأكثر تأخيراً. ومع زيادة نسبة الحمولة يزداد التأخير بشكل كبير بالنسبة لخوارزمية الـ XY لتغدو الأكثر تأخيراً تليها OE ثم NF و WF. في الحمولات المتوسطة تبدي خوارزمية التوجيه NL ثباتاً نسبياً بمعدل زمن الاستجابة كما في خوارزمية DyXY. لكن الأخيرة هي الأكثر فعالية من حيث التأخير (زمن الاستجابة) بين باقي الخوارزميات في الحمولات المتوسطة والعالية.



الشكل (20): المخطط البياني لمعدل زمن الاستجابة مقارنة بتغيرات النسبة المئوية للحمولة.

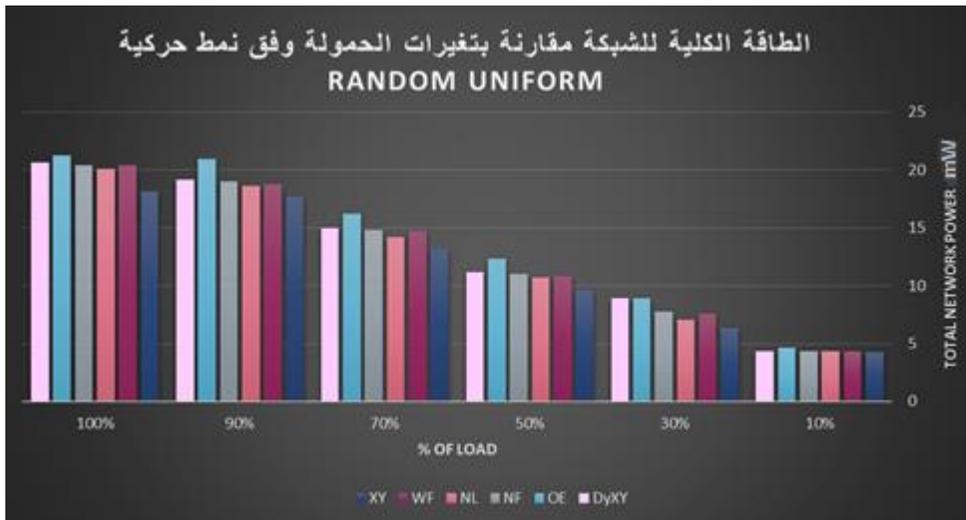
نجد في الشكل (21) تدرج بمعدلات الإنتاجية بزيادة نسبة الحمولة و تقارب واضح في الأداء بين خوارزميات التوجيه XY ، WF و NF. وبينما تتقارب خوارزميات التوجيه DyXY و OE و NL. ومن هنا نلاحظ تأثير زيادة درجة التكيف على تحسين أداء الخوارزميات من حيث

الإنتاجية، فكانت خوارزمية DyXY هي الأفضل تليها OE ثم NL. بينما الأقل معدل إنتاجية كانت خوارزمية XY.



الشكل (21): المخطط البياني لمعدل الانتاجية مقارنة بتغيرات النسبة المئوية للحمولة.

وبيّن الشكل (22) أنه وعند نسب الحمولة المنخفضة يكون معدل استهلاك الطاقة في خوارزميات التوجيه OE وWF هو الأعلى تليهم خوارزمية DyXY كونها تعتمد على قياس مستمر لحالة الازدحام في عقد الشبكة.



الشكل (22): المخطط البياني لاستهلاك الطاقة الكلي للشبكة مقارنة بتغيرات النسبة المئوية للحمولة.

بينما كانت خوارزميتي XY وNL هما الأمثل في استهلاك الطاقة بسبب بساطة تنفيذهما و تحقيق قرار التوجيه فيهما.

الجدول (4) قيم معدل زمن الاستجابة ومعدل الإنتاجية لخوارزميات (XY,OE,DYXY.WF.NL.NF) من أجل نسبة حمولة 50%

خوارزمية التوجيه	Average Throughput	Average Latency
XY	5.90696	66.4783
WF	7.311	68.5387
NL	7.9612	67.7663
NF	7.521	69.0121
OE	9.336	73.661
DyXY	10.186	67.2065

بحساب مقياس الأداء (P) للخوارزميات المدروسة اعتماداً على النتائج المأخوذة من المحاكاة والمبينة في الجدول (4) نجد:

$$P = \text{Performance Metrics (Per channel basis)} = \text{Average Throughput/Average Latency} \dots \dots \dots (4)$$

$$\text{For XY Routing (50\% Load) } P = (5.90696 / 66.4783) = 0.0885$$

$$\text{For West First Routing (50\% Load) } P = (7.311 / 68.5387) = 0.1066$$

$$\text{For North Last Routing (50\% Load) } P = (7.9612/67.7663) = 0.1174$$

$$\text{For Negative First Routing (50\% Load) } P = (7.521 / 69.0121) = 0.1089$$

$$\text{For OE Routing (50\% Load) } P = (9.336 / 73.661) = 0.1267$$

$$\text{For DyXY Routing (50\% Load) } P = (10.186 / 67.2065) = 0.1515$$

نلاحظ تفوق خوارزمية التوجيه المتكيفة DyXY من ناحية الأداء على نظيراتها، و كلما زادت درجة التكيف الجزئي كلما زادت فعالية الخوارزمية (كما في OE و NL).

9- الخاتمة و الاقتراحات المستقبلية:

في هذه المقالة قمنا بدراسة العديد من خوارزميات التوجيه كخوارزميات XY، OE، DyAD، Negative First، North Last، West first، DyXY. الميزة المشتركة فيها كانت خلوها من Deadlock. كما قمنا بمقارنة أداء هذه الخوارزميات أثناء تغير النسبة المئوية للحمولة ولاحظنا التأثير على بارامترات الشبكة كزمن الاستجابة والإنتاجية والطاقة المستهلكة. في القسم الأول من المحاكاة لاحظنا فائدة الدمج بين خوارزمية التوجيه XY وخوارزمية التوجيه OE من خلال الخوارزمية DyAD وذلك بتحليلنا للنتائج التي حصلنا عليها مع الأخذ بعين الاعتبار تكلفة بناء الموجّه في DyAD وصعوبة تنفيذه مقارنة بـ XY، OE و كل هذا يتعلق بالأهداف المرجوة و شروط العمل في الشبكة و متطلبات الأداء التي يحددها المستخدم. فعند الحملات القليلة لا داعٍ لاستخدام خوارزميات ذات استهلاك طاقة كبير كـ OE وتكون خوارزمية الـ XY هي المناسبة لبساطتها وأدائها المقبول. أما عند تباين الحملات فيكون خيار DyAD هو الأفضل لتحقيق إنتاجية عالية بأقل استهلاك للطاقة. وعندما يكون الهدف الحصول على أداء جيد من ناحية الإنتاجية وبأقل تكاليف التنفيذ فـ خيار OE هو خيار جيد. من خلال القسم الثاني من المحاكاة وجدنا تفوق خوارزمية DyXY على باقي الخوارزميات وعند مختلف نسب الحمولة. وتميزت خوارزمية North Last عن نظيراتها في خوارزميات جزئية التكيف من ناحية زمن الاستجابة و الإنتاجية و أيضاً استهلاك الطاقة، كانت نتائجها بالمجمل أقرب لتكون متكيفة و بأقل صعوبة من حيث التنفيذ كونها ليست بحاجة لمعرفة حالة الشبكة مسبقاً، و بالتالي قد تكون خيار جيد لأداء مقبول و تنفيذ أبسط عن خوارزميات التوجيه الكاملة التكيف. من حيث استهلاك الطاقة يمكننا ترتيب الخوارزميات من حيث الأداء الأفضل كالتالي:

Deterministic routing > Partial Adaptive routing > Adaptive routing.

في هذا البحث قمنا بإجراء المقارنة وتحليل الأداء للخوارزميات في الشبكات ذات الطوبولوجية المنتظمة. وبالتالي لابد لنا من تحقيق هذه الخوارزميات ودراستها في شبكات غير منتظمة. من خلال ملاحظتنا لتحسن الأداء عند دمج خوارزميات التوجيه بأنواعها المختلفة كما في الـ DyAD بناء على دراسة حالة الشبكة و تغييرات الحمولة و أداء الخوارزميات عند تغيير البارامترات، سنقوم بإجراء عمليات دمج لخوارزميات أخرى للحصول على أداء أفضل و خاصة من ناحية الإنتاجية و بأقل تكلفة.

العمل على تطوير خوارزمية التوجيه جزئية التكيف North Last كونها ذات نتائج جيدة وللحصول من خلالها على خوارزميات أكثر فعالية وخاصة بمجال الإنتاجية.

قائمة المراجع :

- [1] T. BJERREGAARD and S. Mahadevan. 2006– A survey of research and practices of network-on-chip. ACM Comput. Surv, 51P.
- [2] M. Coppola, M. D.GRAMMATIKAKIS, R. Locatelli, G. MARUCCIA, and L. PIERALISI, 2009 – Design of Cost-Efficient Interconnect Processing Units: Spidergon STNoC. CRC Press, Taylor & Francis Group, 293P.
- [3] J. D. OWENS, W. J. DALLY, R. HO, D. N. JAYASIMHA, S. W. KECKLER, and L.–S. PEH, 2007–Research Challenges for On-Chip Interconnection Networks. IEEE Micro, 27(5):96–108.
- [4] T. Khan, 2017 – Performance Analysis of XY Routing Algorithm Using 2-D Mesh ($M \times N$) Topology. University of Victoria.
- [5] J. DUATO, S. YALAMANCHILI, and L. NI, 2003– Interconnection Networks: An Engineering Approach. Revised Printing. Morgan Kaufmann, 660P.
- [6] T. H. DUNIGAN, J. S. VETTER, J. B. W. III, and P. H. WORLEY, 2005– Performance Evaluation of The Cray X1 Distributed Shared-Memory Architecture. IEEE Micro, 25(1):30–40.
- [7] W. ZHANG, L. HOU, J. WANG, S. GENG, W. WU, 2006 – Comparison Research between XY and Odd-Even Routing Algorithm of a 2-Dimension 3X3 Mesh Topology Network-on-Chip.
- [8] S. D. CHAWADE, M. A. GAIKWAD & R. M. PATRIKAR, 2016– Review of XY Routing Algorithm for Network-On-Chip Architecture .

International Journal of Internet Computing ISSN No: 2231 – 6965,
VOL– 1, 6P.

[9] N. Karimi, A. Alaghi, M. Sedghi and Z. Navabi, 2008 – Online Network-on-Chip Switch Fault Detection and Diagnosis Using Functional Switch Faults” Journal of Universal Computer Science.

vol. 14, Issue no. 22.

[10] L. M. N. CHRISTOPHER J. GLASS, , 1992 – The Turn Model for Adaptive Routing. ACM digital library, East Lansing. 257P.

[11] Ming Li, Qing-An Zeng, Wen-Ben Jone, 2000, DyXY – A Proximity Congestion-Aware Deadlock-Free Dynamic Routing Method for Network on Chip,IEEE ,424P.

[12] U. o. S. UK, 2010 – NIRGAM: A Simulator for NoC Interconnect Routing and Application Modeling. [Online]. Available: nirgam.ecs.soton.ac.uk.

[13] J.SINGH , A. SWAIN, T. REDDY, K. MAHAPATRA, 2013 – Performance Evaluation of Different Routing Algorithms in Network on Chip . IEEE, 441P.

