

## دراسة وتصميم شبكة ربط هجينة متعددة المعالجات وثلاثية الأبعاد مدمجة على شريحة NoC (حلقة ميش المكعبة ثلاثية الأبعاد 3D-MMHcR)

د. محمد حجازية\*

آدم محفوض\*\*

(تاريخ الإيداع 30 / 7 / 2020. قُبِلَ للنشر في 1 / 11 / 2020)

### □ ملخص □

مع تزايد عدد نوى الحوسبة المدمجة على مدى العقود القليلة الماضية تطورت معها تقنيات الحوسبة التفرعية بهدف المحافظة على مستويات الأداء المطلوبة، لذا تم العمل على الدمج بين هذه النوى معاً في معالج واحد لتعزيز الأداء. وهذا دعا إلى التحول والتركيز على قضايا الاتصال أكثر من الحوسبة، حيث أن الربط بين المعالجات والذاكرة وبين المعالجات نفسها يكون لها تأثير أكبر على أداء النظام أكثر من قوة الحوسبة المطبقة ذاتها. وكل ذلك يتحقق بالتصميم الأمثل لشبكات الربط المدمجة على رقاقة NoC (Network-on-Chip) التي تؤمن اتصال عدد كبير من النوى أو المعالجات على شريحة واحدة وتحقق معايير الأداء الأفضل. تم بهذا البحث تصميم شبكة ربط NoC ثلاثية الأبعاد MMHcR تؤمن ربط عدد كبير من النوى (عقد) nodes على شريحة واحدة و تحقق سرعة في النقل وذلك من خلال الدمج بين ثلاث شبكات ستاتيكية Mesh و Ring و Hypercube، وقد أظهرت الشبكة الهجينة المقترحة تحسين أفضل بالأداء وينسب متفاوتة بما يتعلق بالكلفة والقطر والإنتاجية وعرض حزمة التنصيف وقابلية التوسيع و تنوع المسار مقارنة مع الشبكات الثلاثة الساكنة الداخلة بتصميمها.

الكلمات المفتاحية: شبكة الربط ، هجينة ، NoC ، MMHcR ، Ring ، Hypercube ، Mesh

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

## **Studying and Designing of a multi-processor and Three-Dimensional Hybrid Interconnection Network Connected on a NoC(Multi Mesh-Hypercube Connected Ring 3D-MMHcR)**

**Dr. Mohammed Hijazieh \***

**Adam Mahfoud\*\***

**(Received 30 / 7 / 2020. Accepted 1 / 11 / 2020)**

### **□ ABSTRACT □**

As the number of integrated computing cores has increased over the past few decades, sub-computing technologies have evolved to maintain the required performance levels, so these cores have been combined into a single processor to enhance performance. This called for shifting and focusing more on communication issues than computing, as linking processors and memory to processors themselves has a greater impact on system performance than the applied computing power itself. All of this is achieved by optimizing the design of the network-on-Chip (NoC) that connect a large number of cores or processors to a single chip and achieve better performance standards. With this research, the 3D-MMHcR NoC interconnection network was designed to connect a large number of nuclei (nodes) on a single chip and achieve speed of transport by combining three static networks: Mesh, Ring and Hypercube, the proposed hybrid network has shown better performance improvement in varying proportions in terms of cost, diameter, throughput, bisection width, scalability, and path diversity compared to the three static networks integrated with its design.

**Keywords:** Interconnection Network, Hybrid, NoC, MMHcR, Ring, Hypercube, Mesh

---

\*Associate Professor, Department of Computers and Automatic Control Engineering, Faculty of Mechanical and Electrical Engineering, Tishreen University, Lattakia, Syria.

\*\*Postgraduate Student (Master), Department of Computers and Automatic Control Engineering, Faculty of Mechanical and Electrical Engineering, Tishreen University, Lattakia, Syria.

**مقدمة:**

مع التقدم السريع للنظم الرقمية و تطور الأبحاث الخاصة بتحسين الاتصال بين العقد في الدارات المتكاملة Integrated Circuits (ICs) تم الوصول إلى نموذج اتصال داخلي مدمج وهو عبارة عن بنية تعمل كوسيط اتصال بين وحدات المعالجة المختلفة (معالجات-وحدات ذاكرة-واجهات..) على شريحة واحدة. إن مصطلح System-on-Chip SoC يعبر عن نظام متكامل مدمج على شريحة وحيدة يتكون من مجموعة عقد Intellectual Property (IP) تمثل النوى والتي قد تكون معالجات ذات أغراض عامة، معالجات إشارة رقمية Digital signal processors (DSP)، وحدات دخل/خرج I/O، أو ذواكر memories. إن عدد العقد IPs ضمن الشريحة الواحدة وطريقة الاتصال فيما بينها يلعب دوراً مهماً في تحديد الأداء ومستوى التعقيد ضمن الشريحة chip [1] والذي يعتبر أحد أكثر القضايا الحساسة في تصميم SoC والتي أثارت رغبة العديد من الباحثين في السنوات الأخيرة الماضية للدراسة في هذا المجال. توجد العديد من المنهجيات والطرق في التصميم، ومن هذه المنهجيات طريقة الربط point-to-point حيث توفر هذه البنية اتصال من نوع نقطة لنقطة بين العقد IPs، بحيث أن كل عقدة يمكنها الاتصال بالعقد الأخرى بدون تطبيق خوارزميات الأولوية والتحكم. إن هذه الطريقة تملك العديد من العيوب أهمها زيادة المساحة المطلوبة للأسلاك بالأخص مع زيادة عدد العقد، كذلك بطء في استخدام الموارد ضمن الشبكة، والتعقيد العالي وصعوبة قابلية التوسع scalability.

المنهجية الأخرى للتغلب على مشكلة الاتصال داخل شريحة SoC هي تطبيق أنظمة الاتصال المعتمدة على الممرات Bus-Bases حيث يتكون النظام هنا من ممر مشترك يصل عدة عقد IPs مختلفة مع بعضها. كل عقدة IP ضمن النظام يمكنها الاتصال مع ممر أو عدة ممرات من خلال واجهات Interfaces. على الرغم من أن زمن تأخير الاتصال صغير إلا أن زمن الوصول للممر يعتمد على عدد النوى IPs المتصلة مع الممر حيث أن زيادة عدد النوى المتصلة مع الممر يؤدي لزيادة زمن الوصول للممر. وللتحكم بعمليات الوصول للممر يتم تطبيق خوارزميات التحكم للتحكم بتدفق البيانات، وهذا بالطبع يصبح أكثر تعقيداً مع زيادة عدد العقد ضمن النظام وبالنسبة لقابلية التوسع في هذه التقنية فهي محدودة [2].

لهذه الأسباب التي تم ذكرها سابقاً كان الحل الأمثل تصميم الشبكات المدمجة على رقاقة Network-on-Chip (NoC) كشبكات اتصال بيني بإمكانها تقليل مستوى تعقيد الاتصال وكذلك تحسين الأداء في أنظمة SoCs المتعددة المعالجات. تعتبر الشبكات المدمجة على رقاقة (NoC) النموذج الأمثل والقابل للتطوير وتمثل البنية التحتية الإلكترونية لشبكات الاتصال البيئي المستقبلية، حيث يشتمل تصميم NoC على آليات متطورة تدعم الأداء الأمثل، لذا فهناك العديد من خطوات التصميم تبدأ بتحديد طوبولوجيا NoC، تليها رسم خرائط للعقد ضمن الـ NoC، ومن ثم تحديد مخطط التوجيه و جدولة طلبات الاتصال المختلفة لإنجاز شبكة الربط.

**أهمية البحث وأهدافه:**

يهدف البحث إلى تحسين أداء شبكات المعالجات الصغيرة المترابطة والنوى المتصلة على رقاقة NoC من خلال الدمج بين بعض شبكات الربط البسيطة، وبناء شبكة ربط هجينة جديدة ثلاثية الأبعاد 3D-NoC قادرة على تلبية متطلبات الأداء المختلفة وتجاوز القيود المفروضة سواء في شبكات الربط التقليدية التي تعتمد على الممرات Buses أو

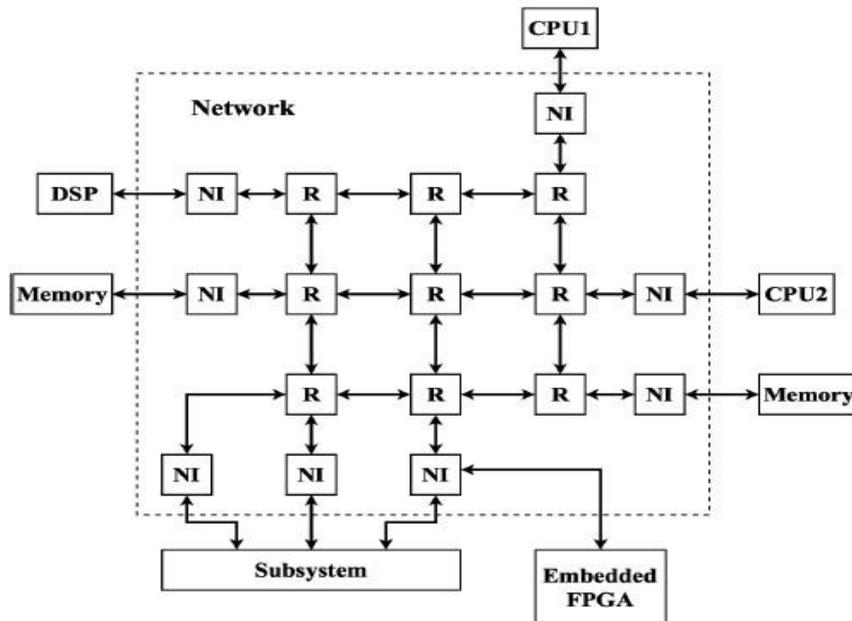
تصميمات NoC المصممة سابقاً. وتكمن أهمية البحث بالحصول على طرق مختلفة لمعمارية شبكات الربط قابلة للتطبيق بمختلف مجالات العمل سواءً في الصناعة أو الأبحاث الأكاديمية وغيرها، وكذلك خدمة الحوسبة المتوازية والموزعة من خلال التغلب على مشاكل الاتصال وتقليل المساحة المخصصة للدائرة التكاملية.

## طرائق البحث ومواده:

### 1- بنية الشبكة المدمجة على رقاقة Network-on-Chip:

تتألف البنية العامة للNoC من مجموعة من العقد أو عناصر المعالجة (PEs) المترابطة مع بعضها ضمن بنية محددة تسمى طبولوجيا Topology، وكل عنصر PE يمكنه إرسال/استقبال بيانات ضمن الشبكة وذلك عبر موجّهات (R) Routers [2]. الدور الأساسي للموجه Router ضمن الNoC هو تلقّي الباكييت وتحديد الاتجاه الذي يجب أن تسلكه حزم البيانات لوصولها لهدفها ويتم ذلك من خلال بروتوكولات التوجيه التي يتم تطبيقها داخل الموجه نفسه.

يظهر تخطيط NoC الموضّح بالشكل (1-1) مكونات النظام المختلفة مثل وحدة المعالجة المركزية CPU، و الذاكرة ومصفوفة البوابات القابلة للبرمجة Field-Programmable Gate Array (FPGA) المضمنة وبلوك DSP وما إلى ذلك، وتتصل هذه العناصر بـ NoC عبر الموجّهات (R) وواجهات الشبكة (NIs) Network Interfaces. يتم توصيل الموجّهات مع الواجهات NIs عبر روابط ثنائية الاتجاه يتم بناءها كمجموعة من ارتباطين أحادي الاتجاه في اتجاهين متعاكسين. وأهم ما يمكن ملاحظته إمكانية تأمين روابط متعددة بين زوج من الموجّهات، ولكن يتم توصيل NI معين وموجه بواسطة رابط واحد فقط. تقوم واجهات الشبكة بتنفيذ وتكامل النوى IPs على الشريحة NoC عبر الموجّهات فهي تعتبر كوسيط، كما تقوم بتأمين اتصال من نوع end-to-end لمختلف النوى IP على الشريحة [3].

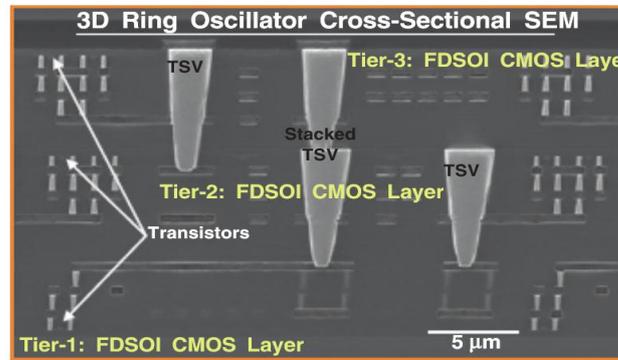


الشكل (1-1) - البنية العامة للشبكة المدمجة على رقاقة NoC [2]

## 2- شبكات NoC ثلاثية الأبعاد 3D-NoC:

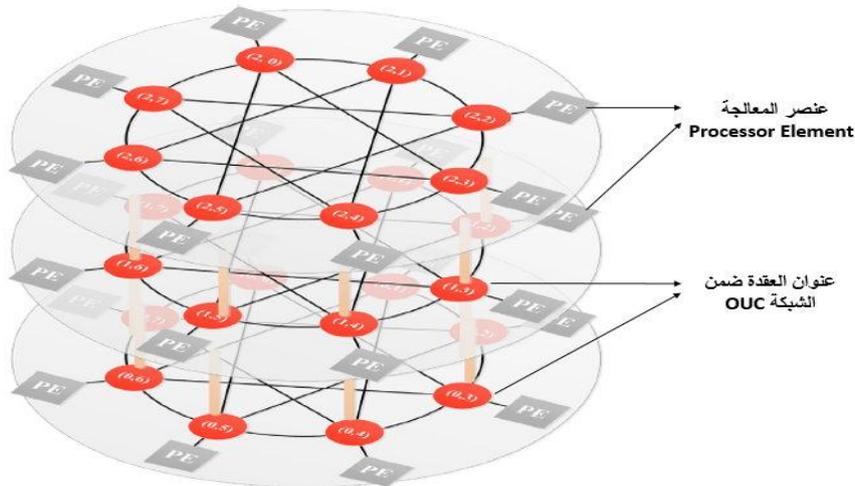
مع زيادة عدد العقد في شبكات NoC فإن البنى ثنائية البعد التقليدية تعاني من قيود كبيرة على مستوى الرقاقة والمساحة المحجوزة. يساهم التصميم ثلاثي الأبعاد للـ NoC في تطوير التصميم الحالي للدارات المتكاملة ICs حيث يؤمن التغلب على القيود المفروضة على مساحة الرقاقة والروابط القصيرة [4].

تم مؤخراً العمل بتقنية Through Silicon Via (TSV) [5] وتطبيقها في تصميم شبكات 3D-NoC من خلال تكديس عدد من الطبقات ثنائية الأبعاد كما هو مبين بالشكل (1-2)، مما ساهم في زيادة عرض النطاق الترددي بين الطبقات وقلل من مساحة الرقاقة وزمن التأخير في سرعة الاتصال وذلك باعتبار أن تقنية TSV تقلل من طول الروابط الرأسية بين الطبقات إلى مستوى ميلي الميكرومتر  $\mu\text{m}$ ، وهذا بدوره يقلل من زمن انتقال الحزمة المرسله عبر الروابط الرأسية إلى حد كبير. توجد العديد من التطبيقات التي تستخدم تقنية 3D-TSV مثل محركات الأقراص الصلبة و 3D-DRAM Stacking.



الشكل (1-2) - تقنية TSV بالاعتماد على التكامل ثلاثي الأبعاد [5]

تعتبر الشبكة الهجينة 3D-OUC [4] مثال عن شبكة ربط ثلاثية الأبعاد حيث تم تصميم هذه الشبكة انطلاقاً من شبكة 2D-OUC ثنائية البعد بعد إضافة روابط رأسية لكل عقدة كما هو مبين بالشكل (2-2)، وقد أظهرت نتائج الدراسة بالمقارنة مع الشبكة الأساسية 2D-OUC انخفاض كبير بزمن التأخير بمقدار 21.54% وتحسين في الإنتاجية بنسبة 12.89% مع تقليل القطر.



الشكل (2-2) - نموذج لشبكة 3D-OUC [4]

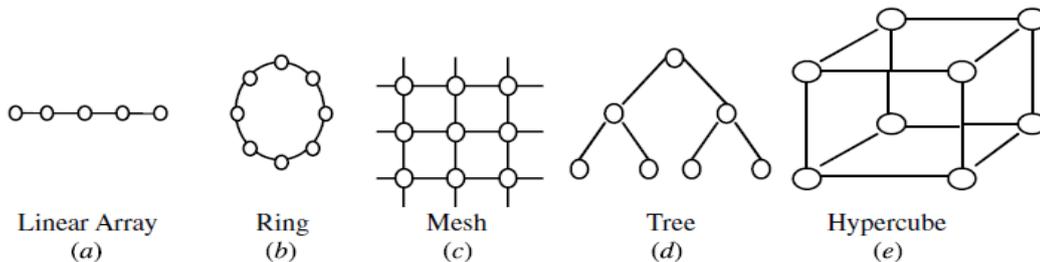
العديد من الدراسات الحديثة المنشورة مؤخراً أولت الاهتمام أكثر بشبكات الربط ثلاثية الأبعاد كونها قدّمت نتائج أكثر إيجابية من حيث تحسين الإنتاجية وتقليل زمن التأخير واستهلاك الطاقة وغيرها كالدراسة المنشورة في العام 2017 (3D-TESH) [6] التي تم فيها تقليل استهلاك الطاقة بمعدل 14.81% وتحسين بالأداء بنسبة 45-52% مقارنة مع شبكة 3D-Tours بـ 16384 عقدة. دراسة أخرى نُشرت في العام 2011 تم خلالها مقارنة بين بنيتين ثلاثيتي الأبعاد هما الطوبولوجيا النجمية ثلاثية الأبعاد (3D-Recursive Network Topology (3D-RNT) و طوبولوجيا الشبكة التعاودية ثلاثية الأبعاد (3D Star topology (3D-ST) من حيث أربع بارامترات هي زمن التأخير، الكمون، قطر الشبكة و تبدد الطاقة وقد أظهرت الشبكة 3D-RNT تحسناً في زمن التأخير latency بمقدار 7% وتحسيناً من حيث تبدد الطاقة بمقدار 11% بالمقارنة مع الشبكة 3D-ST وخلصت الدراسة على أن الشبكة 3D-RNT متفوقة على الشبكة 3D-ST من حيث زمن التأخير و تبدد الطاقة [7].

### 3- شبكات الربط (Interconnection Networks (INs):

تعرف شبكات الربط بأنها مجموعة من العقد (نواة، معالج، ..) المترابطة مع بعضها البعض عبر روابط وخطوط اتصال تشكل بنية متكاملة متعددة المعالجات، بالتالي فإن شبكات الربط تلعب الدور الرئيسي في تقييم النظم متعددة المعالجات. يمكن تصنيف شبكات الربط المتعددة المعالجات (INs) تبعاً لوضع التشغيل (متزامن أو غير متزامن)، استراتيجية التحكم (مركزية أو لا مركزية)، تقنيات التبديل (circuit أو packet)، طوبولوجيا الربط (ساكنة أو ديناميكية) [8]. تم في هذا البحث دراسة المعيار الرابع بالتصنيف وهو طوبولوجيا الربط.

#### 3-1 طوبولوجيا شبكات الربط:

تعرف طوبولوجيا شبكة الربط بأنها طريقة توصيل تحدّد كيفية توصيل مجموعة معالجات و ذواكر مع مجموعة معالجات و ذواكر أخرى بحيث يكون كل معالج متصل مع بقية المعالجات الأخرى ضمن شبكة الربط، على سبيل المثال الطوبولوجيا الحلقية Ring تؤمن توصيل كل معالج k مع جيرانه من المعالجات (k+1) و (k-1). تقسم شبكات الربط بشكل عام إلى شبكات ساكنة وأخرى حركية، حيث تكون الوصلات بين العقد في الشبكات الساكنة ثابتة (point-t-point) وتعرف مثل هذه الشبكات بالشبكات المباشرة Direct Networks، أما في الشبكات الحركية يتم تأمين الاتصال بين العقد فقط عند الحاجة وذلك باستخدام عناصر تبديل وتعرف هذه الشبكات باسم الشبكات الغير مباشرة Indirect Networks. تم بهذا البحث دراسة شبكات الربط الساكنة. قد تحتاج الرسالة المرسلّة في كلا الشبكتين الساكنة والحركية إلى المرور بمعالجات وسيطة أثناء توجيهها إلى الهدف لذلك فإن الأداء الكلي لهذه الشبكات يتأثر بشكل كبير بعدد القفزات التي يتوجب على الرسالة قطعها خلال الشبكة حتى تصل إلى هدفها، ويبين الشكل (1-3) تصاميم مختلفة لشبكات الربط الساكنة [9].



الشكل (1-3) - بعض تصاميم شبكات الربط الساكنة (a) Linear Array, (b) Ring, (c) Mesh, (d) Tree, (e) Hypercube [9]

**2-3 معايير تقييم شبكات الربط:**

تلعب شبكات الربط دوراً مهماً في مجال الحوسبة التفرعية وهناك العديد من العوامل التي تُؤخذ بالاعتبار عند اختيار طريقة الربط المناسبة من أجل ملائمة النظام المطلوب، ويتم تقييم الأداء في شبكات ربط المعالجات الصغيرة من خلال العديد من البارامترات نذكر منها:

1. عدد المعالجات ضمن الشبكة (Network Size (N): وتمثل كل وحدة معالجة ضمن شبكة الربط بعقدة ويرمز لعدد العقد (عدد المعالجات ضمن شبكة الربط) بـ  $N$ .

2. الكلفة الكلية للشبكة (Cost (V): وتمثل عدد الوصلات الكلية الموجودة بالشبكة ويفضل أن تكون كلفة الشبكة أصغر ما يمكن.

3. درجة التعقيد (deg (deg): وهي عبارة عن عدد منافذ الاتصال الموجودة في كل عقدة وتتحدد من خلال المعادلة (1):

$$Deg = d_{in} + d_{out} \quad (1)$$

4. قطر الشبكة (Diameter (D): ويمثل طول الطريق الأطول بين الأزواج المختلفة من العقد، والشبكة ذات القطر الصغير تكون ذات سرعة أكبر في نقل الرسائل، وله المعادلة (2):

$$D = \max \left( \min_{p \in p_{ij}} \text{length}(p) \right) \quad (2)$$

5. عرض حزمة التصنيف (Bisection Width (BW):

وهو أصغر عدد من الوصلات التي يجب قطعها كي تقسم الشبكة إلى شبكتين جزئيتين لكل منها نصف حجم الشبكة الأصلية، ويفضل أن تكون عرض حزمة التصنيف للشبكة أكبر ما يمكن.

6. الإنتاجية (Throughput (TH): وهو عدد الحزم المرسله بنجاح ضمن الشبكة خلال واحدة الزمن ( bits transmitted per nanosecond) ويفضل أن تكون إنتاجية الشبكة أكبر ما يمكن.

7. قابلية التوسع Scalability: وهي إمكانية وسهولة زيادة عدد العقد في الشبكة (توسيع حجم الشبكة) دون التأثير على خصائصها المميزة وبالأخص درجة التعقيد Complexity.

8. تنوع المسار Path Diversity: هي ميزة تتيح إمكانية النقل عبر أكثر من مسار ضمن الشبكة في حال وجود عدة مسارات قصيرة بين الأزواج المختلفة للشبكة نفسها. تنوع المسار في شبكة الربط يعطي نتائج إيجابية أكبر من حيث التسامح مع الخطأ fault Tolerance وسهولة تطبيق خوارزميات التوجيه [10].

9. زمن التأخير Latency: هو جزء من التأخير الفعلي للشبكة أو الزمن اللازم لنقل الحزمة أو البايت من العقدة A إلى العقدة B في شبكة فارغة.

10. تأخير رتل الانتظار Queuing delay: ويمثل الزمن الذي تنتظره الحزمة أو البايت عند وصلة الخروج للعقدة أثناء عملية الإرسال ويتعلق بحالة الازدحام في الشبكة.

11. زمن تأخير المعالجة Processing delay: ويمثل الزمن الذي تستغرقه الموجهات routers أو المبدلات switches لمعالجة معلومات عنوان البايت أو الرزمة.

12. متوسط عدد القفزات Average hop count: وهو يمثل المسافة الوسطية لنقل البيانات عبر الشبكة والتي تحدد عدد الوصلات التي تمر الرسالة عبرها عند النقل بين أي عقدتين ضمن الشبكة، وهي تدخل في تحديد الكلفة cost ومعدل تأخير رتل الانتظار. وبشكل عام كلما زاد عدد الروابط لكل عقدة تتناقص المسافة الوسطية و أيضا عرض الحزمة Bandwidth يتناقص [11][12]. (تم في هذا البحث دراسة الخصائص الثمانية الأولى).

**3-3 التوجيه:**

التوجيه Routing هي عملية إيجاد المسار لكل باكيت packet من العقدة المصدر إلى العقدة الهدف، و تُحدّد خوارزمية التوجيه المطبقة في شبكة الربط المسار الذي تسلكه رزم البيانات عند النقل من العقدة الطرفية المصدر إلى العقدة الهدف [13]، ويعرّف المسار بأنه مجموعة مرتبة من القنوات  $P = \{c_1, c_2, \dots, c_k\}$  (channels) حيث تكون عقدة الخرج للقناة  $c_1$  هي نفسها عقدة الدخّل للقناة  $c_{i+1}$ ، المصدر هو دخل القناة  $c_1$  والهدف هو خرج القناة  $c_k$ . يسمح الاختيار الأمثل لخوارزمية التوجيه في شبكات الربط التي تتيح تعدد المسارات بموازنة الحمل بشكل منتظم عبر القنوات بغض النظر عن حركة المرور ضمن الشبكة، حيث أنه من المهم تنظيم حركة المرور ضمن الشبكة لتحقيق التوازن بالحمل ضمن جميع المسارات بدلاً من حدوث ازدحام بمسار وحيد بينما تكون بقية المسارات الأخرى فارغة [9].

يبين الجدول (1-3) بارامترات الشبكات الساكنة من ضمنها شبكات الربط المدروسة في هذا البحث (Ring, Mesh, Hypercube) بالنسبة لعدة بارامترات حيث يتضح من الجدول أن عدد العقد  $N$  هو المعيار الذي يحدد باقي البارامترات لكل شبكة. بالإضافة لوجود تفاوت في الميزات حيث يفضل أن تملك شبكات الربط قطر صغير وعرض حزمة تصنيف مرتفعة وإنتاجية عالية وكلفة منخفضة مع استهلاك قليل للطاقة وقابلية توسيع عالية مع ميزة التنوع في المسار Path Diversity.

بشكل عام تكون شبكة ربط المعالجات أفضل إذا كانت قادرة على تلبية متطلبات الأنظمة المعقدة و تحقيق الأداء الأفضل من خلال التوازن بين البارامترات المميزة وينسب مقبولة في نظم حاسوبية ضخمة بعدد كبير من المعالجات، أي أن تحقيق توازن متقارب بين هذه البارامترات يعطي تقييماً عالي الأداء لشبكة الربط مع الأخذ بعين الاعتبار قضايا استهلاك الطاقة و الإنتاجية و قابلية التوسيع وزمن التأخير... الخ وفقاً للقيود الموضوعية وبما يتناسب مع الغرض المطلوب تطبيقه بمختلف مجالات العمل سواء في الصناعة أو الأبحاث الأكاديمية وغيرها...

تم مؤخراً اقتراح العديد من التصميمات الهجينة Hybrid لشبكات NoC لتوفير بنية تحتية فعالة للاتصالات على أنظمة معقدة متعددة المعالجات ومثبتة على رقاقة واحدة وذلك من خلال الدمج بين شبكات الربط التقليدية المدروسة سابقاً والمبينة بالجدول (1-3). وقد تم تحسينها لاحقاً وتطويرها بحيث تشمل جميع البارامترات التي تدخل في تحسين أداء النظام أو التطبيق الذي يُعمل عليه. اعتمد البحث الدمج بين ثلاثة شبكات ساكنة Ring+Mesh+Hypercube للوصول لبنية ربط هجينة جديدة ثلاثية الأبعاد يمكنها التغلب على مشاكل الاتصال في الحوسبة المتوازية والموزعة بالاعتماد على مبدأ الدمج Hybridization.

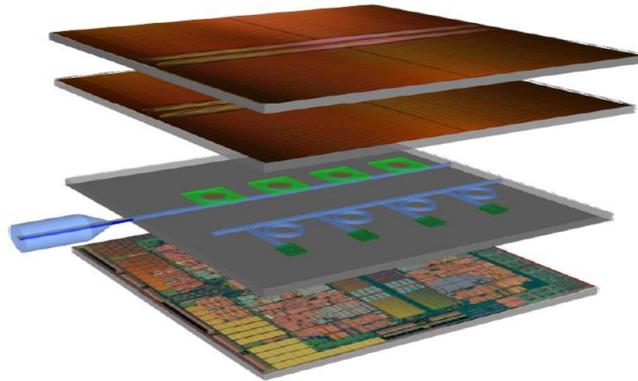
الجدول (1-3) - بارامترات الشبكات الساكنة بالنسبة لعدد العقد  $N$  [14]

Topology	Degree	Diameter	Link Complexity	Bisection
Ring	2	$N/2$	$N$	2
Star	$1, N-1$	2	$N-1$	1
2D-Mesh	2,3,4	$2(\sqrt{N}-1)$	$2(N-\sqrt{N})$	$\sqrt{N}$
3D-Mesh	3,4,5,6	$3(\sqrt[3]{N}-1)$	$3(\sqrt[3]{N}-2)^3 + 15(\sqrt[3]{N}-2)^2 + 24(\sqrt[3]{N}-2) + 12$	$(\sqrt[3]{N})^2$
Hypercube	$\log_2 N$	$\log_2 N$	$N \log_2 N / 2$	$N/2$
2-ary tree	1,2,3	$\log_2((N+1)/2)$	$(\log_2((N+1)/2))^2 + \log_2((N+1)/2)$	1
Fat 2-ary Tree	$2^0, 2^1, 2^2, \dots, N$	$2 \log_2(N)$	$N \log_2 N$	$N/2$
Fully Connected	$N-1$	1	$N(N-1)/2$	$N^2/4$
Dual-cube	$(\log_2 N + 1)/2$	$\log_2 N + 1$	$N(\log_2 N + 1)/2$	$N/3$
2D-torus	4	$2\lfloor \sqrt{N}/2 \rfloor$	$2N$	$2\sqrt{N}$
folded 2D-Torus	4	$2\lfloor \sqrt{N}/2 \rfloor$	$2N$	$2\sqrt{N}$
3D-Torus	6	$3\lfloor \sqrt{N}/2 \rfloor$	$3N$	$2\sqrt{N}$
Folded 3D-Torus	6	$3\lfloor \sqrt{N}/2 \rfloor$	$3N$	$2\sqrt{N}$
Butterfly( $k, m$ )	$2k$	$m+1$	$k^m(m+1)$	$k^m$
Meta-cube( $k, m$ )	$m+k$	$(2^k)(m+1)$	$(m+k)2^{2^k m + k - 1}$	$2^{2^k m - 1}$
CCC	3	$n + \lfloor n/2 \rfloor - 2$	$3n2^{n-1}$	$2^{n-1}$

## 4- الشبكة المقترحة:

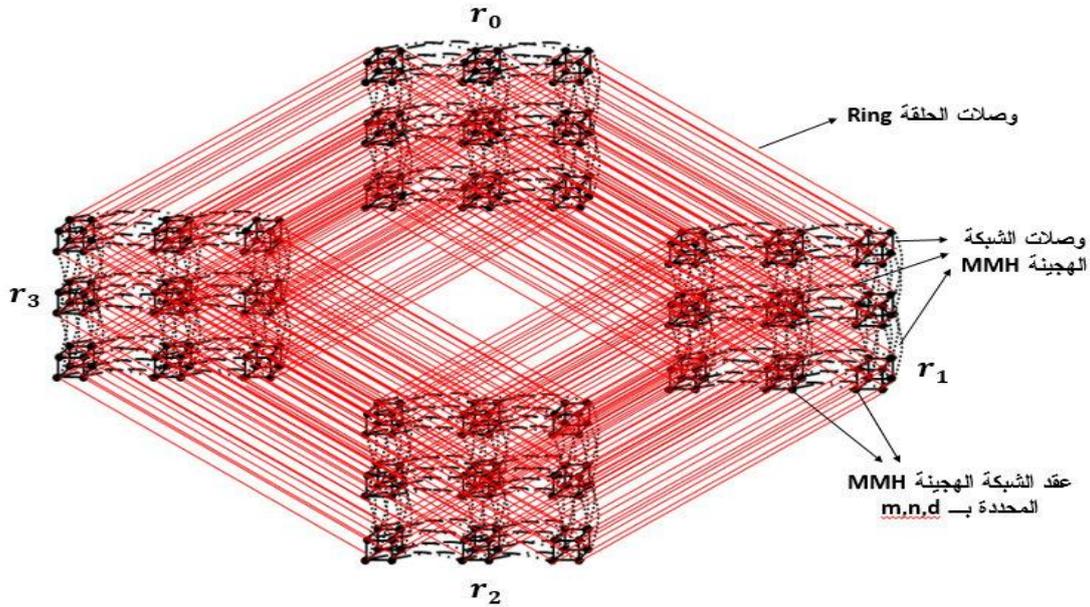
## حلقة Mesh المكعبة (MMHcR (Multi-Mesh Hypercube connected Ring)):

الشبكة المقترحة MMHcR هي حلقة Ring يتم استبدال كل عقدة منها بالشبكة الهجينة Multi-Mesh (Ring+Mesh+Hypercube) [12]، بالتالي هي عبارة عن دمج ثلاث شبكات ربط (Ring+Mesh+Hypercube) ساكنة، حيث يتم بذلك الاستفادة من الخصائص الإيجابية للشبكة الحلقية مثل الكلفة المنخفضة و درجة التعقيد الثابتة (والتي تساوي 2)، ومزايا الشبكة المكعبة كالمقترحة، الاتصالية العالية، التجانس الجيد، التوجيه البسيط والتسامح مع الخطأ، وأيضاً للشبكة Mesh وبالأخص قابلية التوسع Scalability و كذلك انتظامها وبساطتها وتعقيدها المنخفض. هذه المعمارية المناسبة للشبكة المقترحة تسمح بتطبيقها في تقنيات شبكات الربط ثلاثية الأبعاد 3D-NoC لإتاحة تقليل المساحة المخصصة للدائرة التكاملية و تقليل التأخير في سرعة الاتصال وكذلك زيادة عرض النطاق الترددي، أيضاً الهيكلية التي تقدمها هذه الطبولوجيا تملك القدرة على التغلب على مشاكل الاتصال في الحوسبة الموزعة وذلك بسبب التوازي المتأصل فيها، فقد أظهرت الدراسات الحديثة أن وصلات الفضاء الحر free-space المصممة بطبولوجيا ربط ثلاثية الأبعاد كما هي مبينة بالشكل (1-4) بإمكانها توفير نطاق ترددي أفضل للاتصال واستهلاك أقل للطاقة بما يتناسب مع أنظمة الشرائح المتكاملة واسعة النطاق VLSI والدوائر الإلكترونية البصرية [15]، والتي بالإمكان تطبيقها في الشبكة المقترحة.



الشكل (1-4) - تكامل ثلاثي الأبعاد 3D-Integration باستخدام شرائح السيلكون الضوئية [15]

تتميز الشبكة MMHcR بأربع بارامترات (m,n,r,d) حيث m تمثل عدد أسطر الشبكة Mesh، و n عدد أعمدة الشبكة Mesh، و r عدد عقد الحلقة Ring، بينما d هو بُعد المكعب Hypercube. يبين الشكل (2-4) طبولوجيا الشبكة MMHcR(3,3,4,3) أي من أجل شبكة Mesh(3×3) وشبكة حلقيّة Ring بأربع عقد (r=4) مع دمج شبكة مكعبة Hypercube ببعد d=3.



الشكل (2-4) \_ بنية الشبكة الهجينة MMHcR(3,3,4,3)

تشير الخطوط السوداء المتصلة إلى الوصلات بين عقد المكعبات Hypercubes ضمن الشبكة الهجينة، والخطوط السوداء المتقطعة تشير إلى وصلات الشبكة Multi Mesh Hypercube (MMH) التي تصل المكعبات ضمن شبكة Mesh الواحدة والتي هي أيضاً بالأساس وصلات الشبكة Mesh البسيطة. أما الخطوط الحمراء المتصلة فهي تشير إلى الوصلات الحلقيّة التي تربط العقد المتقابلة بين كل شبكتي MMH ضمن الشبكة الهجينة، والتي هي أيضاً بالأساس وصلات الحلقة Ring الداخلة بالتصميم.

#### 1-4 توابع الربط في الشبكة MMHcR:

تُحدد الشبكة المقترحة MMHcR بأربع بارامترات (m,n,r,d). بالتالي فإن عنوان أي عقدة ضمن الشبكة يتحدد بأربع مكونات (i, j, k, l) حيث :

$$0 \leq i < m, 0 \leq j < n, 0 \leq k < r, 0 \leq l < 2^d$$

البارامتران j و i يحدّدان عنوان العقدة ضمن الشبكة Mesh، و k تحدّد عنوان العقدة ضمن الحلقة Ring، بينما l تحدّد عنوان العقدة ضمن المكعب  $Q_d$ ، فمثلاً العقدة (2,1,0,4) تقع ضمن العقدة الأولى رقم (0) من الحلقة Ring بالمكعب الذي يقع عند تقاطع السطر الثالث و العمود الثاني من مصفوفة MMH وضمن العقدة ذات العنوان (100) بالتمثيل الثنائي من المكعب Hypercube. عندها يمكن كتابة توابع الربط للشبكة MMHcR(m,n,r,d) بين أي عقدتين  $(i_1, j_1, k_1, l_1)$  و  $(i_2, j_2, k_2, l_2)$  وفق القواعد الآتية:

**القاعدة (1):** يتم إنشاء وصلة *hypercube link* بين أي عقدتين لهما  $i_1 = i_2$  و  $j_1 = j_2$  و  $k_1 = k_2$ ، بينما  $l_1$  و  $l_2$  تختلفان عن بعضهما ببيت واحد بالتمثيل الثنائي (*Hamming Distance*). هذه القاعدة تولّد  $m \times n \times r$  مكعب بعدد  $d$  وهذ المكعبات تكون منفصلة عن بعضها البعض حتى تطبيق القاعدة (2).

**القاعدة (2):** يتم إنشاء وصلة *mesh link* بين أي عقدتين لهما  $k_1 = k_2$  و  $l_1 = l_2$ ، وكل من  $i$  و  $j$  يختلف أحدهما بيت واحد بينما يكون الآخر متطابق. هذه القاعدة تولّد  $r \times 2^d$  وصلة *mesh* بعدد  $m \times n$ .

**القاعدة (3):** يتم إنشاء وصلة تسمى *Ring link* بين أي عقدتين لهما  $i_1 = i_2$  و  $j_1 = j_2$  و  $l_1 = l_2$ ، بينما تكون  $k_1$  و  $k_2$  تختلفان عن بعضهما ببيت واحد فقط بالتمثيل الثنائي. هذه القاعدة تولّد  $m \times n \times 2^d$  وصلة حلقيّة بين أي عقدتين حلقيتين متجاورتين ضمن الشبكة الهجينة MMHcR.

بإجراء دمج بين القواعد السابقة يمكن الحصول على الوصلات الكاملة للشبكة الهجينة والتي تمثل الكلفة الكلية للشبكة Cost، وعندها يمكن كتابة توابع الربط لأي عقدة ضمن الشبكة الهجينة  $MMHcR(m, n, r, d)$  حيث أن  $i, j, k, l$  تمثل المكونات الأربعة لعنوان العقدة، ويكون عدد هذه التوابع سبعة وهي:

- $mmhcr_{m1}(i, j, k, l) = ((i + 1) \bmod m, j, k, l)$
  - $mmhcr_{m2}(i, j, k, l) = ((m + i - 1) \bmod m, j, k, l)$
  - $mmhcr_{m3}(i, j, k, l) = (i, (j + 1) \bmod n, k, l)$
  - $mmhcr_{m4}(i, j, k, l) = (i, (n + j - 1) \bmod n, k, l)$
  - $mmhcr_{r1}(i, j, k, l) = (i, j, (k + 1) \bmod r, l)$
  - $mmhcr_{r2}(i, j, k, l) = (i, j, (r + k - 1) \bmod r, l)$
  - $mmhcr_h(i, j, k, (l_{d-1} \dots l_{hc+1} l_{hc} l_{hc-1} \dots l_0)) = (i, j, k, (l_{d-1} \dots l_{hc+1} \overline{l_{hc} l_{hc-1} \dots l_0}))$  for  $hc = 0, 1, \dots, d - 1$
- [12]  $(0 \leq l < 2^d)$  لـ  $l_{d-1} \dots l_{hc+1} l_{hc} l_{hc-1} \dots l_0$  التمثيل الثنائي لـ  $l$ .

إن توابع الربط الأولى أعلاه  $mmhcr_{m1}, mmhcr_{m2}, mmhcr_{m3}, mmhcr_{m4}$  هي من أجل الوصلات الجيران الأربع الأقرب لكل عقدة ضمن شبكة MMH (Mesh المكعبية)، والتي تمثل عقدة واحدة من الحلقة Ring، بينما  $mmhcr_{r1}$  و  $mmhcr_{r2}$  هي توابع الربط الحلقيّة للعقد المتناظرة ضمن الحلقة (التي تملك نفس عنوان الموقع بالنسبة للشبكة Mesh والمكعب بينما تختلف بموقع العقدة ضمن الحلقة)، وأخيراً  $mmhcr_h$  يحدد توابع الربط ضمن المكعب نفسه  $hc = 0, 1, \dots, d - 1$ .

#### 2-4 خوارزمية التوجيه في الشبكة MMHcR:

تسمح خوارزمية التوجيه الموزعة المتبعة في الشبكة الهجينة MMHcR بوجود عدة مسارات بديلة للنقل بين أي عقدتين مختلفتين عبر الشبكة، حيث أنه من أجل شبكة  $MMHcR(m, n, r, d)$  لو افترضنا عنوان العقدة المصدر S هو  $(i_s, j_s, k_s, l_s)$  وعنوان العقدة الهدف T هو  $(i_t, j_t, k_t, l_t)$  حيث:

$$0 \leq i_s < m, 0 \leq i_t < m, 0 \leq j_s < n, 0 \leq j_t < n, \\ 0 \leq k_s < r, 0 \leq k_t < r, 0 \leq l_s < 2^d, 0 \leq l_t < 2^d$$

عندها تكون آلية التوجيه المتبعة من S إلى T تعتمد بشكل أساسي على خوارزميات التوجيه للشبكة المكعبية بحجم  $2^d$  أو شبكة Mesh  $(m \times n)$  أو الشبكة الحلقيّة ( $r$ ) أو الدمج بين خوارزميتي اثنتين من تلك الشبكات أو تبعاً للخوارزمية الناتجة عن دمج الخوارزميات الثلاث معاً بأن واحد وكل ذلك تبعاً لموقع كل من العقدتين المصدر والهدف ضمن الشبكة الهجينة (عنوان العقدة)، وتكون بذلك الخوارزمية الهجينة تتبع إحدى الخوارزميات السبعة التالية:

### **الحالة (1): خوارزمية التوجيه المكعبة Routing within a hypercube:**

بحالة  $i_s = i_t$  and  $j_s = j_t$  and  $k_s = k_t$  عندها فإن كل من  $S$  و  $T$  موجودتين ضمن نفس المكعب (لهما نفس العنوان ضمن الشبكة Mesh ونفس العقدة من الحلقة) وبهذه الحالة يتم تطبيق خوارزمية التوجيه المتبعة بالشبكة المكعبة  $n$ -cube  $(2^d)$  [16].

### **الحالة (2): خوارزمية توجيه ميش Routing within a Mesh:**

بحالة  $k_s = k_t$  and  $l_s = l_t$  عندها فإن كل من  $S$  و  $T$  موجودتين ضمن نفس العقدة من الحلقة ولهما نفس العنوان للشبكة المكعبة لكن بموقعين مختلفين للشبكة Mesh وبهذه الحالة يتم تطبيق خوارزمية التوجيه المتبعة بالشبكة Mesh  $(m \times n)$  [17].

### **الحالة (3): خوارزمية توجيه الحلقة Routing within a Ring:**

بحالة  $i_s = i_t$  and  $j_s = j_t$  and  $l_s = l_t$  عندها فإن كل من  $S$  و  $T$  موجودتين ضمن عقدتين مختلفتين من الحلقة Ring لكن بنفس العناوين لكل من المكعب و Mesh وبهذه الحالة يتم تطبيق خوارزمية التوجيه المتبعة بالشبكة الحلقية  $(r)$ .

### **الحالة (4): خوارزمية توجيه هجينة Mesh-Hypercube Routing:**

عند تحقق الشرط  $k_s = k_t$  فقط عندها فإن كل من  $S$  و  $T$  موجودتين ضمن نفس العقدة من الحلقة لكن مع اختلاف عناوين شبكتي Mesh والمكعبة، عندها يتم نقل الرسالة عبر خوارزمية التوجيه المتبعة بالحالة (1) وبعدها تطبق خوارزمية توجيه Mesh الحالة (2)، أو العكس.

### **الحالة (5): خوارزمية توجيه هجينة Ring-Hypercube Routing:**

عندما يكون الشرط  $i_s = i_t$  and  $j_s = j_t$  فقط محقق تكون عندها تكون عقدتي المصدر والهدف  $S$  و  $T$  موجودتين بعقدتين حلقيتين مختلفتين وبموقعين مختلفين بالنسبة للمكعب hypercube لكن لهما نفس عنوان الشبكة Mesh، بهذه الحالة إما تطبق أولاً خوارزمية التوجيه المكعبة بالحالة (1) وبعدها تطبق خوارزمية التوجيه الحلقية الحالة (3) لنقل الرسالة إلى العقدة  $T$  النهائية، أو العكس.

### **الحالة (6): خوارزمية توجيه هجينة Mesh-Ring Routing:**

عندما يكون الشرط  $l_s = l_t$  فقط محقق تكون عندها عقدتي المصدر والهدف  $S$  و  $T$  موجودتين ضمن عقدتين حلقيتين مختلفتين وبموقعين مختلفين ضمن الشبكة Mesh لكن لهما نفس عنوان المكعب، بهذه الحالة إما تطبق خوارزمية توجيه Mesh بالحالة (2) أولاً، وبعدها تطبق خوارزمية التوجيه الحلقية الحالة (3)، أو العكس.

### **الحالة (7): خوارزمية توجيه هجينة Mesh-Ring-Hypercube Routing:**

بحال عدم تحقق أي شرط من الشروط المذكورة أعلاه بمعنى أن عناوين العقدتين  $S$  و  $T$  بالنسبة للشبكات الثلاثة Mesh و Ring و Hypercube مختلف عندها تسلك خوارزمية التوجيه الهجينة إحدى المنهجيات:

- R1: Routing within a hypercube → Mesh\_Ring Routing
- R2: Routing within a Mesh → Ring\_Hypercube Routing
- R3: Routing within a Ring → Mesh\_Hypercube Routing

### **3-4 بارامترات الشبكة الهجينة:**

تمّ بهذا القسم دراسة أهم ميزات الشبكة MMHcR المشروحة بالفقرة (2-3) من البحث، ومن أجل سهولة الرسم وإجراء المقارنات المطلوبة تمّ اقتراح حجم الشبكة Mesh والحلقية Ring والمكعبة Hypercube الداخلة في بنية الشبكة الهجينة المقترحة MMHcR(m,n,d,r) هو نفسه، أي أنه من أجل حجم الشبكة  $N$  يكون حجم كل شبكة

فرعية هو  $\sqrt[3]{N} = n \times m$  للشبكة Mesh،  $\sqrt[3]{N} = 2^d$  للشبكة المكعبة،  $\sqrt[3]{N} = r$  للشبكة الحلقية) حيث  $N$  تأخذ القيم  $2^x$  من أجل  $x = 2, 3, 4, 5, \dots$

#### 1-3-4 الحجم:

وهو عدد العقد الكلي ضمن الشبكة وهو جداء حجم الشبكة Mesh وحجم الشبكة المكعبة والشبكة Ring:

$$N_{MMHcR} = N_{Mesh} \times N_{Ring} \times N_{Hypercube} = m \times n \times r \times 2^d \quad (3)$$

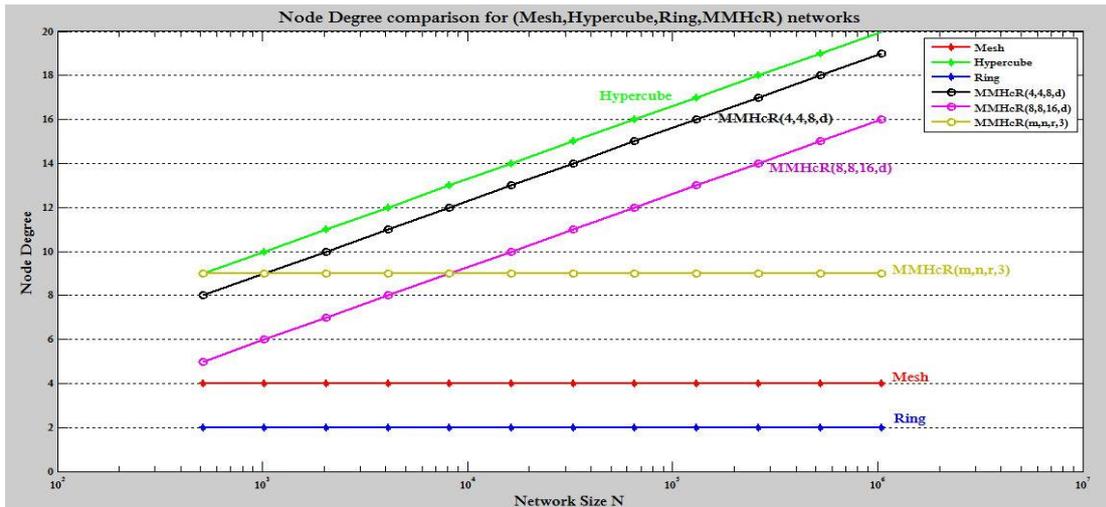
حيث دوماً  $N_{Mesh} = m \times n$  و  $N_{Ring} = r$  و  $N_{Hypercube} = 2^d$ .

#### 2-3-4 درجة التعقيد:

وهي مجموع درجة التعقيد لكل الشبكات الداخلة بالدمج:

$$Deg_{MMHcR} = Deg_{Mesh} + Deg_{Ring} + Deg_{Hypercube} = 4 + 2 + d = 6 + d \quad (4)$$

يبين الشكل (3-4) المنحني الممثل لتعقيد الشبكة الهجينة مقارنةً مع الشبكات المكونة لها حيث يتبين أنّ درجة التعقيد للشبكة الهجينة MMHcR يتعلق ببعد الشبكة المكعبة الداخلة في التصميم، فمن أجل  $d=3$  يكون تعقيد الشبكة الهجينة ثابت دوماً  $Deg_{MMHcR} = 9$ ، أما عند تغيير قيم  $m, n, r, d$  تكون درجة تعقيد الشبكة الهجينة متغيرة وتتناقص من أجل قيم  $m, n, r$  الكبيرة (قيم  $d$  الصغيرة) مع زيادة عدد المعالجات  $N$ .



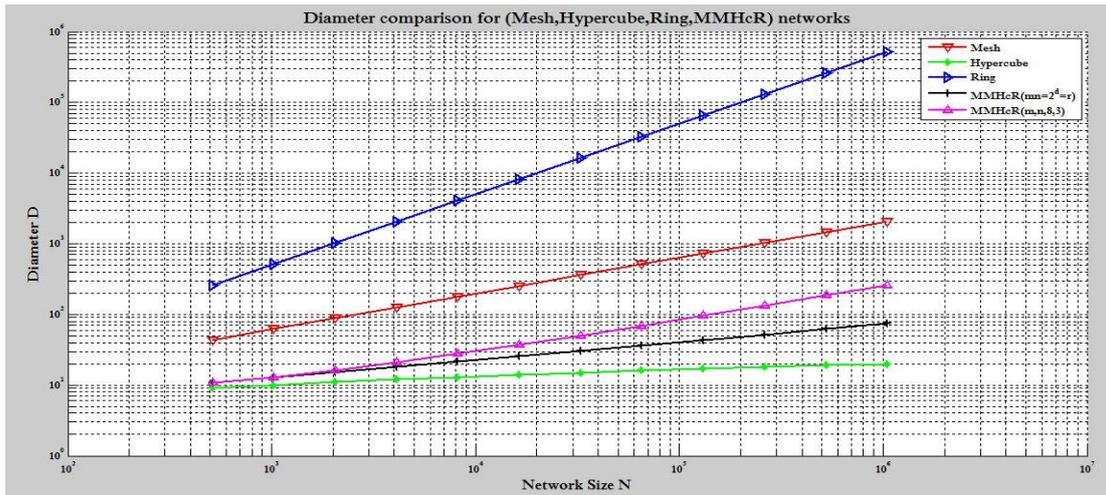
الشكل (3-4) - منحنى درجة التعقيد للشبكة الهجينة MMHcR و شبكات Mesh, Ring, Hypercube

#### 3-3-4 القطر:

إن قطر الشبكة الهجينة MMHcR يساوي مجموع قطر كل شبكة من الشبكات الداخلة بالدمج:

$$D_{MMHcR} = D_{Mesh} + D_{Ring} + D_{Hypercube} = 2(\sqrt{m \times n} - 1) + d + \frac{r}{2} \quad (5)$$

يبين الشكل (4-4) المنحني الممثل لقطر الشبكة الهجينة والشبكات الثلاث المكونة لها حيث يتبين أنّ قطر الشبكة الهجينة أصغر من قطر الشبكة Mesh والشبكة Ring لكنه أكبر بقليل من قطر الشبكة المكعبة. يظهر الشكل نفسه منحنيين للشبكة الهجينة بحالتين الأولى هي التوزيع العادل للعقد الكلية على الشبكات البسيطة أي  $mn = r = 2^d$  والحالة الثانية هي تثبيت  $d=3$  و  $r=8$  فقط مع تغيير حجم الشبكة Mesh تبعاً لقيم  $N$ .



الشكل (4-4) - منحنى القطر للشبكة الهجينة MMHcR وشبكات Mesh, Ring, Hypercube

#### 4-3-4 الكلفة (عدد الوصلات الكلي):

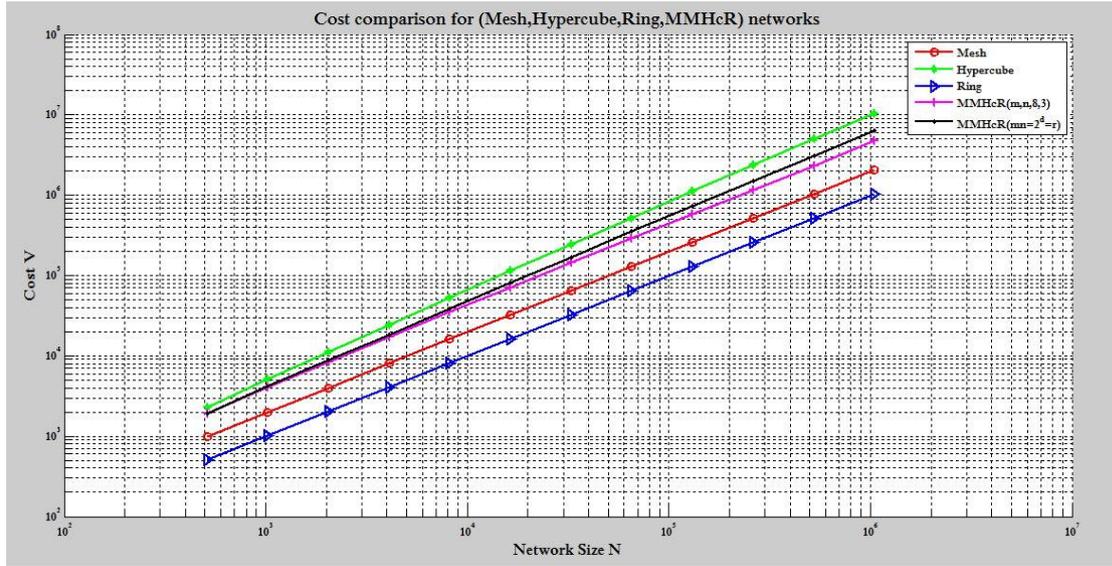
وهي عدد الوصلات الكلية الموجودة ضمن الشبكة ويمكن حسابها بمجموع كلفة المكعب الواحد مضروباً بعدد المكعبات الكلي ضمن الشبكة MMHcR مضافاً إليه كلفة الشبكة Mesh ذات المكعبات MMH مضروباً بعدد عقد الحلقة مضافاً إليها كلفة الشبكة الحلقية مضروباً بعدد عقد الشبكة MMH (عدد العقد ضمن عقدة حلقية واحدة):

$$V_{MMHcR} = \left( \frac{1}{2} \times d \times 2^d \times (m \times n \times r) \right) + \left( (2^d \times 2(m \times n - \sqrt{m \times n})) \times r \right) + (r \times (m \times n \times 2^d)) \quad (6)$$

باستبدال البارامترات المميزة m,n,r,d بأحجام الشبكات المرتبطة بها وعلى اعتبار أن كل الشبكات لها الحجم نفسه عندها تكون كلفة الشبكة الهجينة MMHcR كالتالي:

$$V_{MMHcR} = N \times (3 + 0.5d) - 2 \times \sqrt{N \times 2^d \times r} \quad (7)$$

يتبين من الشكل (4-5) أن كلفة الشبكة الهجينة MMHcR أقل من كلفة الشبكة المكعبية الداخلة بتصميمها عند تغيير حجم الشبكة (من 512 معالج وحتى  $2^{20}$  معالج) لكنها أكبر من كلفة كل من شبكتي Mesh و Ring من أجل نفس عدد المعالجات N.



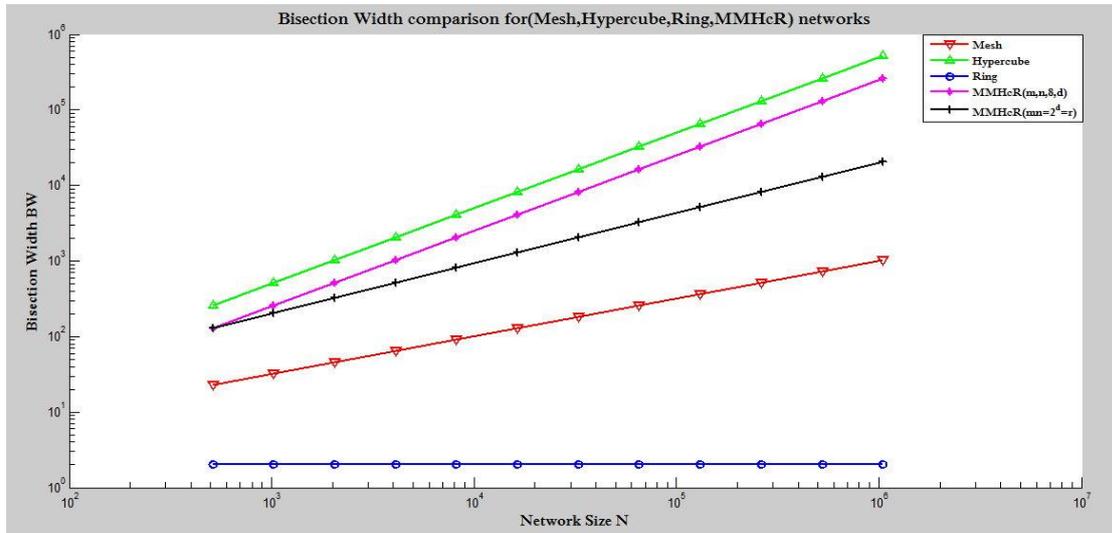
الشكل (5-4) - منحنى الكلفة للشبكة الهجينة MMHcR وشبكات Mesh, Ring, Hypercube

**5-3-4 عرض حزمة التنصيف:**

وهو يمثل عدد الوصلات التي يجب قطعها كي تقسم الشبكة لشبكتين جزئيتين حجم كل منهما يساوي نصف حجم الشبكة الأصلية، والطريقة الأبسط لحساب عرض حزمة التنصيف هي قطع الوصلات الحلقية، بالتالي يكون  $BW_{MMHcR} = BW_{Ring}$  لكن كل وصلة من وصلات الشبكة الحلقية تم استبدالها بـ  $m \times n \times 2^d$  وصلة بالتالي يكون عرض الحزمة للشبكة الهجينة MMHcR هو:

$$BW_{MMHcR} = 2 \times m \times n \times 2^d = 2N/r \quad (8)$$

يفضل أن يكون عرض حزمة التنصيف بأكثر قيمة، وكما يتبين من الرسم البياني الممثل لعرض حزمة التنصيف للشبكة الهجينة MMHcR والشبكات الداخلة بتصميمها في الشكل (6-4) أن عرض حزمة التنصيف للشبكة الهجينة أكبر بكثير من عرض حزمة التنصيف للشبكة Mesh وللشبكة الحلقية لكنه أقل بقليل من عرض حزمة التنصيف للشبكة المكعبة عندما يتغير عدد المعالجات بين القيمتين 512 و  $2^{20}$ ، وتزداد قيمته عند أخذ عدد عقد الحلقة Ring صغير كما هو مبين بالشكل السابق نفسه حيث تم أخذ  $r=8$ .



الشكل (6-4) - منحنى عرض حزمة التنصيف للشبكة الهجينة MMHcR وشبكات Mesh, Ring, Hypercube

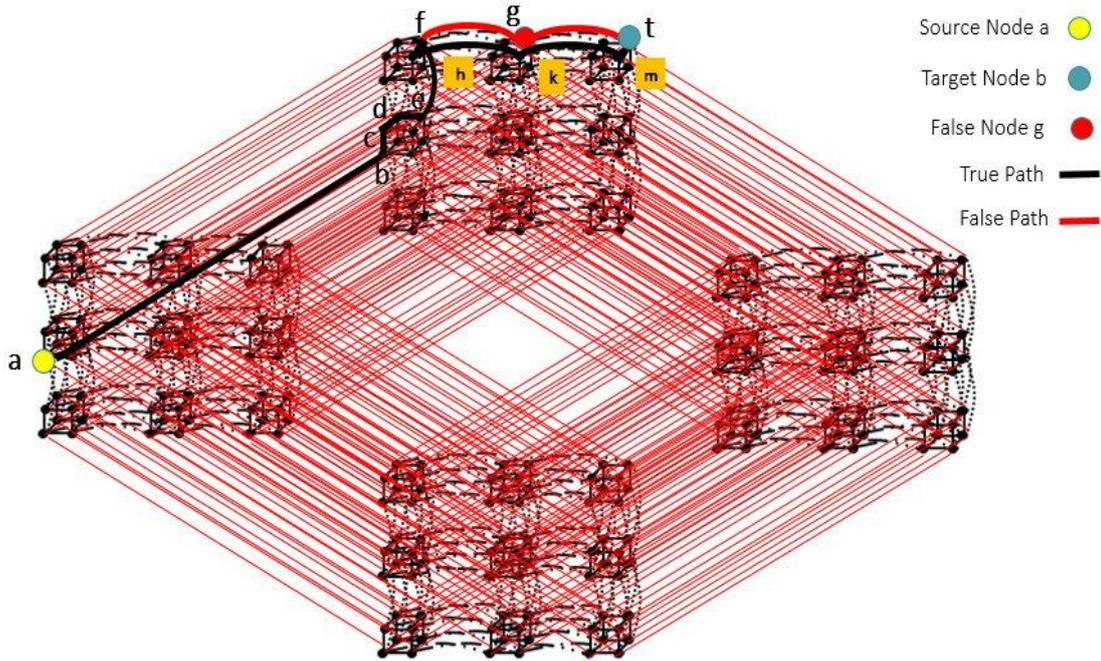
**6-3-4 قابلية التوسع Scalability:**

يمكن الملاحظة من مخطط درجة التعقيد للشبكة MMHCR في الشكل (3-4) بحالة مكعب ثابت أي مع قيمة ثابتة  $d-1$  - فرضاً  $d=3$  - أن درجة التعقيد للشبكة الهجينة تأخذ منحني ثابت أي درجة تعقيد ثابتة بمعنى أن حجم الشبكة الهجينة يمكن أن يكون قابل للتوسع من خلال توسيع حجم شبكة Mesh أو من خلال زيادة عدد عقد الحلقة بدون أن تتأثر درجة التعقيد (عدد الوصلات للعقدة الواحدة) من العقد الموجودة كما هو الحال لو قمنا بالتوسع بالشبكة المكعبية. وهذه ميزة مرغوبة بالنسبة لشبكات الربط حيث أنه من المرغوب ألا يزداد عدد المنافذ ports لكل عقدة مع ازدياد عدد العقد الكلي للشبكة بنفس المعدل عند زيادة حجم الشبكة [18]، أي أن شبكة الربط التي تضمن درجة تعقيد ثابتة تكون ذات أداء أعلى بالأخص فيما يتعلق ببناء أنظمة ربط قابلة للتطوير، وهو ما حققته الشبكة المقترحة MMHCR.

**7-3-4 التسامح مع الخطأ Fault Tolerance:**

إن زيادة عدد مكونات الشبكة من الممكن أن تزيد من احتمالية وجود أخطاء على مستوى الاتصال، بالنسبة للشبكة واسعة النطاق Large-scale لا يمكننا توقع احتمالية وجود فشل في أحد المكونات من عدمه لذا من الممكن توقع استمرار العمل بشكل صحيح ضمن عدد محدود من الأخطاء على الأقل، ونظراً للترامن المستمر بين الشبكات الثلاث Mesh و Ring و Hypercube ضمن الشبكة الهجينة MMHCR فإنه يمكن توجيه الرسائل عبر الشبكة مع وجود فشل في عقدة ما أو خطأ ضمن قناة اتصال معينة link بسهولة وذلك باستخدام خوارزميات التوجيه المبتعة للتعامل مع الأخطاء. بالنسبة للشبكة الهجينة MMHCR يمكن تجاوز أي عقدة خطأ أو رابط فيه فشل من خلال قفزين إضافيتين فقط طالما أن هذه العقدة غير مشاركة في الاتصال بمعنى أنها ليست عقدة مصدر أو ليست عقدة هدف لأي رسالة. أيضاً يجب التنويه إلى أن آلية التسامح مع الخطأ في الشبكة الهجينة MMHCR عند حدوث خطأ في عقدة ما هو نفسه ما ذكرناه سابقاً عند حدوث فشل بوصلة ارتباط حيث يتم أيضاً بوصلتين إضافيتين فقط.

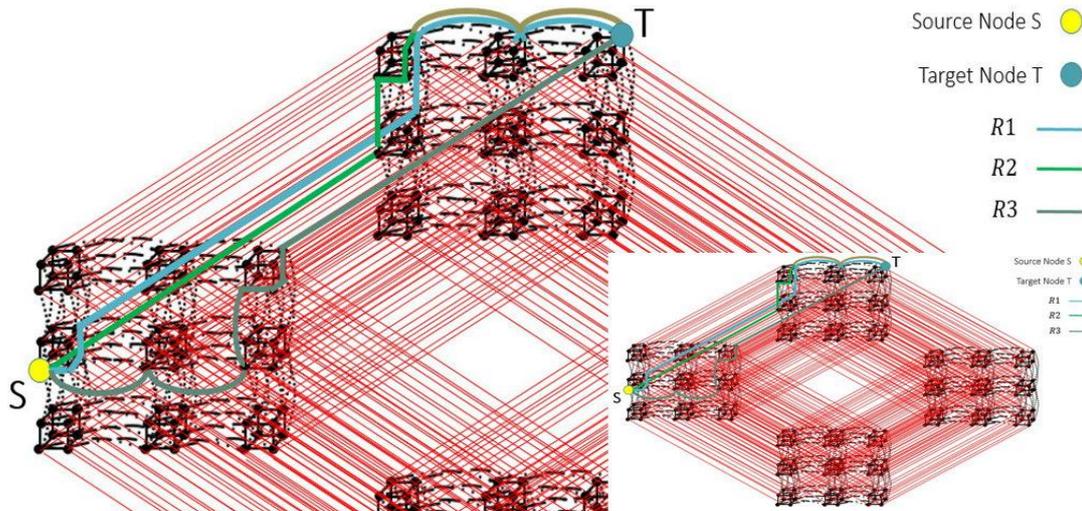
يوضح الشكل (4-7) مخطط إعادة التوجيه في الشبكة MMHCR بحالة وجود فشل بعقدة معينة حيث أن العقدة المصدر للرسالة الموجهة هي a والعقدة الهدف هي t ولتكن العقدة التي فيها خطأ هي g عندها تنتقل الرسالة بداية عبر خوارزمية التوجيه الحلقية من a إلى b بقفزة واحدة، ثم تنتقل عبر خوارزمية التوجيه المكعبية من b إلى e عبر ثلاث قفزات من خلال c و d، والآن من العقدة e يتم تطبيق خوارزمية توجيه Mesh لتنتقل الرسالة إلى f، لكن مع وجود العقدة الخطأ g يتم توجيه الرسالة لتقادي الفشل إلى الجار الأقرب للعقدة f عبر قناة اتصال مكعبية إلى العقدة h، ثم تستكمل الرسالة خوارزمية توجيه Mesh حتى وصولها العقدة m، حيث يتم إرجاعها إلى الشبكة الفرعية الأصلية التي توجد بها العقدة الهدف t عبر قناة اتصال مكعبية، بالتالي تم تجاوز العقدة الخطأ ضمن مسار التوجيه باستخدام وصلتين إضافيتين فقط هما  $f \rightarrow h$  و  $t \rightarrow m$ .



الشكل (7-4) - آلية التسامح مع الخطأ في الشبكة الهجينة MMHcR

**8-3-4 تنوع المسار Path Diversity:**

تتيح خاصية تنوع المسار لشبكة الربط امتلاك أكثر من مسار قصير من بين عدة مسارات متاحة للانتقال بين عقدتين مختلفتين عبر الشبكة، بالتالي يكون هناك عدد من المسارات القصيرة التي يمكن للرسالة عبورها واختيار أحدها بحال حدوث ازدحام عبر مسار معين أو تعطل قناة اتصال ما ضمن مسار، مما يسمح من التقليل بشكل فعال من ازدحام الشبكة وتعزيز التسامح مع الأخطاء، يتبين من الشكل (8-4) وجود ثلاثة مسارات  $R1, R2, R3$  من بين ستة مسارات قصيرة ممكنة تم ذكرها بالحالة (7) بالفقرة (2-4) و بنفس عدد القفزات hop count (hop count=7) للانتقال عبر المسار  $S \rightarrow T$ .



الشكل (8-4) - تنوع المسار في الشبكة الهجينة MMHcR

### 9-3-4 الإنتاجية المثالية Ideal Throughput

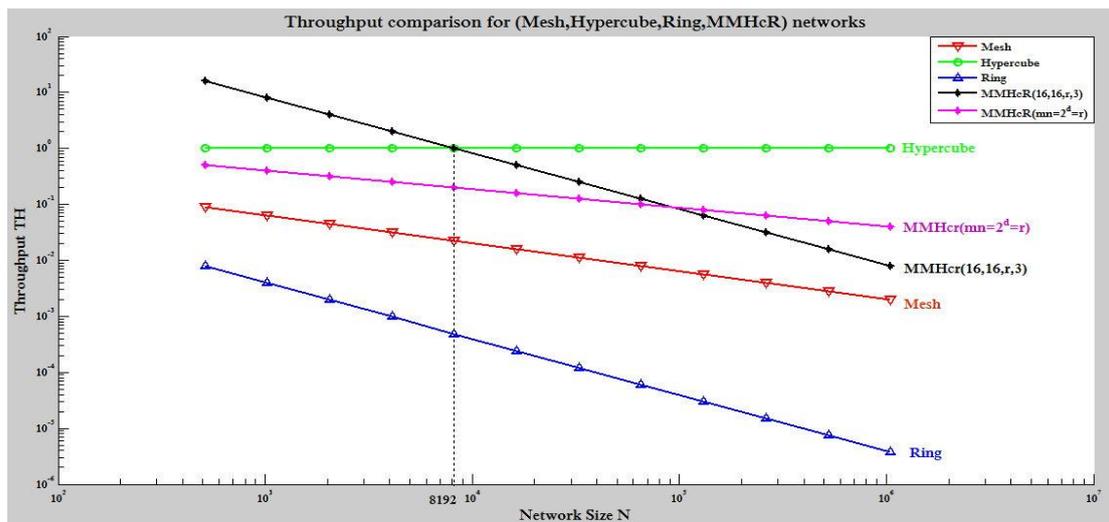
تعرف الإنتاجية المثلى بأنها القيمة العظمى للإنتاجية لشبكة الربط عند تطبيق خوارزمية توجيه تضمن توازن الأحمال وإذا كان التحكم بالتدفق لا يسمح بوجود دورات خاملة و تجاوز لمشكلة عنق الزجاجة، وهي تمثل عدد الرسائل المرسله بنجاح ضمن الشبكة خلال واحدة الزمن (bits/ nanosecond) [19] وقد عرفها William James Dally, et al. [9] بالقانون  $TH \leq 2b * Bc / N$  حيث :

- TH الإنتاجية وواحدتها bits/ nanosecond .
- b عرض القناة وواحدته flit/cycle وسنفترضه ثابت (b=1) ضمن الشبكة MMHcR والشبكات الداخلة بتصميمها.
- Bc ويمثل عرض حزمة التنصيف.
- N يمثل حجم الشبكة (عدد العقد الكلي).

الجدول (1-4) - الإنتاجية المثلى للشبكة MMHcR وشبكات Mesh, Ring, Hypercube الداخلة في تصميمها

MMHcR	Mesh	Hypercube	Ring	Topology
$\frac{4 * m * n * 2^d}{N}$	$2/\sqrt{N}$	1	$4/N$	Ideal Throughput

بالتالي يمكن تشكيل الجدول (1-4) الذي يقارن الإنتاجية المثلى بين الشبكة MMHcR والشبكات الثلاث الداخلة في تصميمها: يبين الشكل (9-4) أن إنتاجية الشبكة المقترحة MMHcR أعلى من إنتاجية شبكتي Mesh و Ring لكنها أقل من إنتاجية الشبكة المكعبية الثابتة ( $D_{Hypercube} = 1$ ) وذلك عند تصميم الشبكة الهجينة وفق التوزيع العادل لحجم الشبكات الثلاث ( $mn = 2^d = r$ )، لكن يمكن زيادة الإنتاجية وجعلها أكبر من إنتاجية الشبكة المكعبية لو تم التصميم بأحجام مختلفة لأحجام الشبكات الداخلة بالدمج، فمثلاً من أجل ( $m=16, n=16, d=3$ ) يكون منحنى الإنتاجية (المحدد باللون الأسود بالشكل (9-4) أعلاه) أكبر من إنتاجية الشبكة المكعبية عندما  $N < 2^{13} = 8192$ .



الشكل (9-4) - الإنتاجية في الشبكة الهجينة MMHcR وشبكات Mesh, Ring, Hypercube

## الاستنتاجات والتوصيات:

تمّ في هذا البحث اقتراح شبكة ربط هجينة 3D-NoC ثلاثية الأبعاد MMHcR من خلال دمج ثلاث شبكات ربط ساكنة وهي الشبكة المكعبية Hypercube والشبكة Mesh والشبكة الحلقية Ring بهدف دمج أكبر عدد من النوى على نفس الشريحة بما يخدم قضايا الحوسبة الموزعة والاستفادة قدر الإمكان من الخصائص الإيجابية التي تتمتع بها كل شبكة من الشبكات الثلاث السابقة والوصول لمستوى جيّد من الأداء يتناسب مع حجم الشبكة الجديدة ، وبالاعتماد على البارامترات التي تمت دراستها ضمن هذا البحث وتطبيق هذه البارامترات على عدد متغيّر من المعالجات (العقد) تمّ التوصل إلى النتائج الآتية فيما يخص الشبكة المقترحة MMHcR:

- قطر أصغر من قطر الشبكة Mesh والشبكة Ring.
- كلفة أقل من كلفة الشبكة المكعبية الداخلة بالتصميم عند تغير حجم الشبكة لكنه أكبر من كلفة كل من شبكتي Mesh و Ring من أجل نفس عدد المعالجات N.
- عرض حزمة التنصيف أكبر بكثير من عرض حزمة التنصيف للشبكة Mesh والحلقية.
- قابلية للتوسيع بشكل كبير من خلال توسيع حجم شبكة Mesh أو من خلال زيادة عدد عقد الحلقة، فمن أجل  $d=3$  كانت  $Deg_{MMHcR} = 9$  ومن أجل  $d=4$  كانت  $Deg_{MMHcR} = 10$  وهكذا....
- إنتاجية أعلى من إنتاجية بقية الشبكات البسيطة المكونة لها حتى من الشبكة المكعبية ذات الإنتاجية الثابتة ( $D_{Hypercube} = 1$ ) عند تطبيق دمج للشبكات بأحجام مختلفة.
- التسامح مع الخطأ من خلال قفرتين إضافيتين فقط.
- تميّزت الشبكة المقترحة بخاصية تنوع المسار من خلال تنوع خوارزميات التوجيه التي يمكن اتباعها لنقل الرسالة عبر الشبكة.

بالتالي أثبتت الشبكة المقترحة MMHcR فعالية تطبيقها كشبكة NoC عند ربط عدد كبير من النوى على شريحة واحدة وتحقيقها للأداء الجيّد مع إمكانية تطويرها وتوسيعها دون التأثير على زيادة عدد المنافذ لكل عقدة مع تحقيق إنتاجية عالية وقطر صغير مقارنةً مع تزايد حجم الشبكة.

## References:

- [1] Shwigi, K . " Design and Evaluation of Force-Directed (FD) Routing Algorithm in 2D Mesh Network on Chip", Master of Computer Engineering, University of Victoria, 2018.
- [2] Mohan, V . " Performance Analysis and Optimizations for Network on Chip Paradigm "Master of Philosophy, The Hong Kong University of Science and Technology, August 2016.
- [3] Tatas, K ; Jantsch, A ; Siozios, K; Soudris, D. " Designing 2D and 3D Network-on-Chip Architectures ". Springer New York Heidelberg Dordrecht London, 271P, 2014.
- [4] Wang, Z; Gu, H; Chen, Y; Yang, Y; Wang, K. "3D network-on-chip design for embedded ubiquitous computing systems". Journal of Systems Architecture 000 (1-8), m5G; November 11, 2016.
- [5] Chen, X, " Efficient Memory Access and Synchronization in NoC-based Many-core Processors", Doctoral Thesis in Information and Communication Technology, Stockholm, Sweden 2019.
- [6] Al Faisal, F; Rahman, H; Inoguchi, Y. "A new power efficient high performance interconnection network for many-core processors ", J. Parallel Distrib. Comput. 101 (2017) 92–102.

- [7] Viswanathan, N; Paramasivam, K; Somasundaram, K. " Exploring Hierarchical, Cluster based 3D Topologies for 3D NoC". *Procedia Engineering* 30 (2012) 606 – 615.
- [8] El-Rewini, H; Abd-El-Barr, M. "Advanced Computer Architecture and Parallel Processing". *Wiley Series on parallel and distributing series editor: Albert Y. Zomaya, Published by John Wiley & Sons, Inc., Hoboken, New Jersey, Canada, 287P, 2005.*
- [9] Dally, W,J; Towles, B." *Principles and Practices of Interconnection Networks*". Morgan Kaufmann Elsevier, 581P, 2004.
- [10] Sadiq ,E. " Short Message Network-On-Chip Interconnect for ASIC". Master's thesis in system-on-chip design, Second Level. Stockholm, Sweden, 2014.
- [11] 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.
- [12] A, Lour; H, Sung," An Optical Multi-Mesh Hypercube: A Scalable Optical Interconnection Network for Massively Parallel Computing".*The University of Arizona. Preprint of a paper to appear in the IEEE-OSA Journal of Lightwave Technology, Vol. 12, April 1994.*
- [13] Balkan,A ,O, " Mesh-of-Trees interconnection network for an explicitly multi-threaded parallel computer architecture". Doctoral of Philosophy, University of Maryland, 2008.
- [14] CHEN, J, "Performance evaluation of network-on-chip architecture", Master of Engineering, Faculty of Engineering and Applied Science Memorial University of Newfoundland, May 2012.
- [15] Brunina, D, " Optically-Connected Memory: Architectures and Experimental Characterizations", Doctoral of Philosophy, Columbia University, 2012.
- [16] H. J. Siegel, "Interconnection Networks for Large-scale Parallel Processing". New York, NY: McGraw-Hill, 1990.
- [17] D. Nassimi; S. Sahni, "An Optimal Routing Algorithm for Mesh Connected Parallel Computers," *Journal of the ACM*, vol. 27, pp. 6-29, January 1980.
- [18] Sharieh,A; Qatawneh, M; Almobaideen, W; Sleit, A." Hex-Cell: Modeling, Topological Properties and Routing Algorithm". *European Journal of Scientific Research*, ISSN 1450-216X Vol.22 No.2 (2008), pp.457-468.
- [19] Thakyal, D; Chatterjee, P, "Dia-Torus: A Novel topology for network-on-chip design", *International Journal of Computer Networks & Communications (IJCNC)* Vol.8, No.3, May 2016.