

اقتراح خوارزمية لتحديد مسارات التدفقات IP عبر شبكات النقل DWDM

د. جمال خليفة*

د. إسماعيل جنود**

م. يحيى حسن***

(تاريخ الإيداع 2020/ 11/ 23. قُبل للنشر في 2021/ 1/ 14)

□ ملخص □

يكتسب نقل المعطيات عبر الألياف الضوئية باستخدام تقنية التجميع المعتمدة على تقسيم الطول الموجي الكثيف (DWDM) أهمية فائقة مع نمو الحاجة إلى تجميع تدفقات للمعطيات ذات سرعات عالية تتجاوز 100 Gbps مع بعضها عبر شبكات النقل الضوئية. ومن هنا يكتسب دمج IP و DWDM لنقل تدفقات IP عبر الشبكات الضوئية التي تدعم DWDM بكفاءة وفعالية مهمة ملحة.

يسعى البحث إلى تحسين أداء الشبكات المعرفة برمجياً غير الكبيرة وإنشاء الروابط المحتملة بينها، بالإضافة إلى تلبية متطلبات حركة البيانات مع الأخذ بالاعتبار وضع الوصلات بين كل زوج من العقد والتكلفة لكل مسافة في الشبكة الضوئية المرتبطة بمعدلات إرسال مختلفة للتوصيلات الضوئية بهدف إيجاد التكوين الأمثل، ذي الكلفة الأقل. وتم التوصل إلى اقتراح خوارزمية لتشكيل مسارات التدفق IP وذلك بالاعتماد على نموذج رياضي ينطلق من تمثيل الشبكة ببيان graph ذي مستويين، المستوى الفيزيائي الذي يمثل البنية الفيزيائية المكونة من شبكة DWDM وعقد العملاء المرتبطة بها والتي تعتبر شبكة نقل للمعطيات، والمستوى المنطقي الذي يمثل وظيفة الشبكة على مستوى نقل تدفقات IP. كما تم اختبار هذه الخوارزمية وتبين أنها مناسبة لعمل مثل هذه الشبكات وأنها تمتاز عن غيرها في سرعة الأداء سواء عند إنشاء المسارات أو عند إنعاش المسارات البديلة في حالة فشل بعض الوصلات التي تعتمد عليها هذه المسارات.

الكلمات المفتاحية: الشبكات المعرفة بالبرمجيات SDN، بروتوكول OpenFlow، Mininet، ONOS، DWDM، تدفقات IP.

*أستاذ - قسم هندسة الاتصالات والالكترونيات - كلية الهندسة الميكانيكية والكهربائية - جامعة تشرين - اللاذقية - سورية.

**أستاذ مساعد - قسم هندسة الاتصالات والالكترونيات - كلية الهندسة الميكانيكية والكهربائية - جامعة دمشق - دمشق - سورية.

***طالب دراسات عليا (دكتوراه) - قسم هندسة الاتصالات والإلكترونيات - كلية الهندسة الميكانيكية والكهربائية - جامعة تشرين - اللاذقية - سورية.

An algorithm for determining the IP flows paths over DWDM transport networks

Dr. Jamal Khalifeh*

Dr. Ismael Jannoud**

Eng. Yehia Hassn***

(Received 23/ 11/2020. Accepted 14/ 1/2021)

□ ABSTRACT □

Data transmission over optical network using Dense Wavelength Division Multiplexing (DWDM) technology is gaining prominence with the growing need to aggregate high-speed data streams of more than 100 Gbps together over optical transmission networks. Hence integrating IP and DWDM to transport IP flows over optical networks that support DWDM efficiently and effectively acquires an urgent task.

This research aims to improve the performance of non-large, Software Defined Networks and establish their links, in addition to meet the requirements of data traffic, taking into consideration the setting of connections between each pair of nodes and the cost per distance in the optical network associated with different transmission rates for optical connections in order to find the optimal configuration lower cost. An algorithm has proposed to form the IP flow paths based on a mathematical model that starts from the network representation with a two-level graph, the physical level that represents the physical structure consisting of the DWDM network and its associated client nodes which are considered a data transmission network and the logical level that represents the network function on Transport level of IP streams. This algorithm has also been tested and found to be suitable for the work of such networks and to have an advantage over others in terms of speed of performance, both when establishing the paths or when reviving alternative paths in the event that some of the links adopted by these paths fail.

Key Words: Software-Defined Networking (SDN), OpenFlow Protocol, Mininet, ONOS, DWDM, IP Streams.

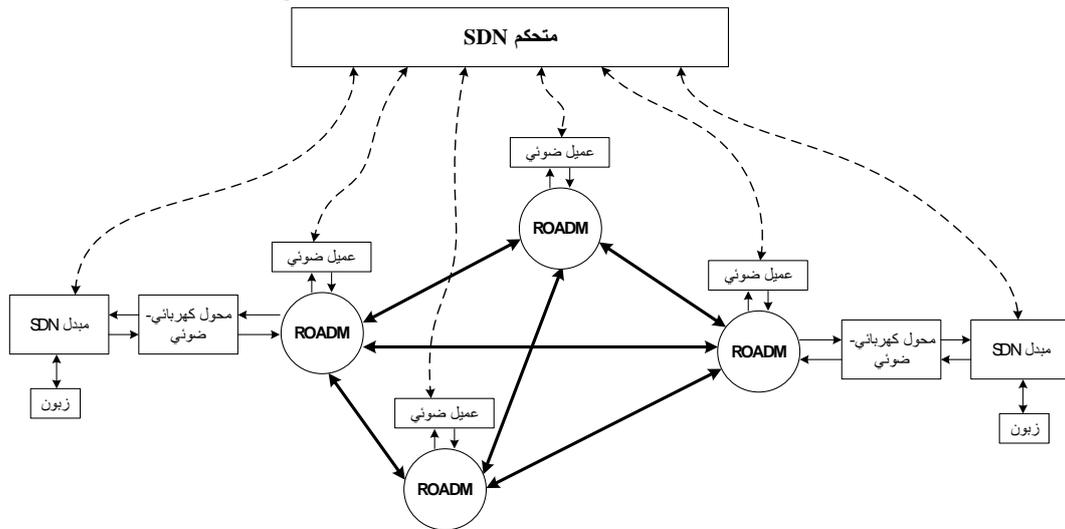
* Professor, Department of communications and Electronics, Faculty of Mechanical and Electrical Engineering, Tishreen University, Lattakia, Syria.

** Associate prof, Department of communications and Electronics, Faculty of Mechanical and Electrical Engineering, Damascus University, Damascus, Syria.

*** PhD student, Department of communications and Electronics, Faculty of Mechanical and Electrical Engineering, Tishreen University, Lattakia, Syria.

1. مقدمة:

تتميز الشبكات الضوئية بمزايا السعة العالية ومسافة الإرسال الطويلة والاستهلاك المنخفض للطاقة، وهذا أكسبها انتشاراً واسعاً كبنية تحتية لشبكة النقل الأساسية لتطبيقات الإنترنت التي تتطلب توفر اتصال بشبكة نقل ذات معدل نقل عال لدعم التطبيقات غير المتجانسة. يسمح تطوير تقنيات وآليات لدمج الشبكة الضوئية مع SDN، أي الشبكة الضوئية المعرفة بالبرمجيات (SDON)، بإيجاد حلول لطيف واسع من المشاكل الناجمة عن ضرورة استخدام الشبكات الضوئية كشبكة نقل لخدمة هذه التطبيقات في الإنترنت، والتي يمكن أن توفر اتصالاً ذي معدل عال لمعدل البت ومرونة في الاستخدام [4-1]، كما هو موضح في الشكل (1).



الشكل (1) بنية شبكة SDN

ومن بين الشبكات الضوئية يكتسب نقل المعطيات عبر الألياف الضوئية باستخدام تقنية التجميع المعتمدة على تقسيم الطول الموجي الكثيف DWDM، أهمية فائقة مع نمو الحاجة إلى تجميع تدفقات للمعطيات ذات سرعات عالية تتجاوز 100 Gbps مع بعضها عبر شبكات النقل الضوئية [5-7]. يعد دمج IP و DWDM لنقل حركة مرور IP عبر الشبكات الضوئية التي تدعم DWDM بكفاءة وفعالية مهمة ملحة، ولذلك لا بد من حل المشاكل التي تنشأ بسبب ذلك للوصول إلى شبكات فائقة السرعة [8-10]. وفي هذا الإطار يتم استخدام الألياف الضوئية في شبكات النقل لتوجيه المعطيات عن طريق تخصيص أطوال موجية بالآليات تؤمن إمكانية هذا النقل بأقل احتمالية لحجب التدفقات.

يتم العمل على التكامل بين الشبكات الضوئية وشبكات IP باستخدام طرق وتقنيات متعددة: تكامل مستوى البيانات، والتحكم متعدد الطبقات والمرونة، والتخطيط متعدد الطبقات والإدارة. تبعاً لنوع الشبكة وبنيتها وحجمها، وآليات تشغيلها، ويفسح ذلك الطريق لتطبيق تقنية الشبكات المعرفة برمجياً بما يسمح بالتعامل مع النمو المطرد لحركة المرور القادمة من خدمات IP والتطبيقات التي تركز على المحتوى، من خلال الاستخدام السهل والديناميكي للبنية التحتية الأسهل التي تقلل بشكل كبير من تعقيد تشغيل الشبكة. ورفع كفاءة الاعتماد على شبكات النقل عالية السرعة والتي تعتمد أساساً على استخدام الألياف الضوئية. تعتمد معظم شبكات النقل الأساسية والشبكات الموجودة حالياً على طبقة نقل بصرية تعتمد على تقنية تقسيم الطول الموجي (Wavelength Division Multiplexing) WDM. بفضل التطور التكنولوجي البصري، ننتقل إلى

بنية تحتية مرنة وشفافة لإدارة الطلب على التدفقات تعتمد على ROADM لنقل الرزم عبر شبكات DWDM [11-13].

تساعد SDN المشغلين على تقليل نفقات التركيب والتشغيل وزيادة مرونة الشبكة وتحسين مواردها ومع ذلك، فإن حلول الشبكات المعرفة بالبرمجيات قيد التطوير حالياً لا تزال متجانسة إلى حد ما، وغير مهيأة بشكل جيد لبناء الشبكات غير المتجانسة كالشبكات ذات البنية المختلطة الكهربائية والضوئية [2,3]. نتناول في هذا البحث، مشكلة إيجاد التكوين الأمثل، ذي الكلفة الأقل، وذلك بالاعتماد على نموذج رياضي ينطلق من تمثيل الشبكة ببيان graph ذي طبقتين، الطبقة الفيزيائية التي تمثل البنية الفيزيائية المكونة من شبكة DWDM وعقد العملاء المرتبطة بها والتي تعتبر شبكة نقل للمعطيات، والطبقة المنطقية التي تمثل وظيفة الشبكة على مستوى نقل تدفقات IP.

2. أهمية البحث وأهدافه

تتطلب أهمية البحث من ضرورة اعتماد الشبكات الضوئية المعرفة برمجياً SDON على التكامل بين الشبكات الضوئية وشبكات IP باستخدام طرق وتقنيات متعددة تبعا لنوع الشبكة وبنيتها وحجمها، وآليات تشغيلها، بما يفسح الطريق لتطبيق تقنية الشبكات المعرفة برمجياً للتأقلم مع النمو المطرد لحركة المرور القادمة من خدمات IP والتطبيقات التي تركز على المحتوى، من خلال الاستخدام السهل والديناميكي للبنية التحتية الضوئية وإدارة الطلب على التدفقات التي تعتمد على مجموعات الإضافة والحذف القابلة لإعادة التشكيل Reconfigurable optical add-drop multiplexer (ROADM) وذلك لتأمين نقل الرزم عبر شبكات DWDM. يهدف هذا البحث إلى إيجاد نموذج رياضي للشبكات المعرفة برمجياً يعتمد على تصور من مستويين فيزيائي مرتبط بالبنية ومنطقي مرتبط بالوظيفة وبحيث يتم توصيف متغيرات وقيود هذا النموذج بشكل يسهل عملية استخدامها في عمل الخوارزمية التي سيتم اقتراحها من أجل تشكيل المسارات الفيزيائية لتدفقات IP المطلوب تمريرها عبر شبكات IP التي تعتمد شبكات النقل الضوئي DWDM والاعتماد على هذا النموذج لاقتراح خوارزمية لعمل متحكم شبكة SDN حين قيامه باختيار المسارات الأفضل لتمرير تدفقات IP عبر هذه الشبكات بشكل يوفر الوقت ويرفع من فعالية الاستخدام.

3. طرائق البحث ومواده:

تم الاعتماد في انجاز هذا البحث على:

- 1- القيام بدراسة مرجعية لتحديد أهمية هذا البحث ومقارنة نتائجه بنتائج هذه الأبحاث من أجل تقييم مدى أهمية نتائجه.
- 2- وضع نموذج رياضي يمكن الاعتماد عليه لوضع خوارزمية مناسبة تستخدم من قبل المتحكم في تحديد المسارات المناسبة لتدفقات IP.
- 3- وضع الخوارزمية وتقييمها

- 4- دراسة البيئة الافتراضية التي سيتم تنفيذ الحلول المقترحة عليها، ومقارنة الحلول المبنية على هذه الخوارزمية التي تم وضعها، ومقارنتها وتقييم أدائها كميًا وتحليل المخططات الناتجة عن ذلك.
- 5- وضع التوصيات بشأن الحلول المقترحة استنادًا إلى النتائج التي تم الحصول عليها.

4. الدراسات المرجعية

دفعت الأهمية المتزايدة للخدمة الهاتفية منذ عدة عقود، معظم شركات الاتصالات لنشر شبكات الألياف الضوئية، من أجل ضمان توافر الخدمات المناسبة. وقد تم تصميم هذه الشبكات بطريقة توفر العديد من المسارات المستقلة بين كل زوج من العقد باستخدام مختلف التقنيات ومن بينها التقنيات التي تعتمد على استخدام نفس الوسط الفيزيائي بتطبيق تقنيات تقسيم القنوات. وقد اتجهت الدراسات إلى استخدام نماذج مختلفة لهذه الشبكات لاستنباط خوارزميات جديدة بكفاءة عالية لتتناسب التطبيقات المختلفة. ومن أجل ذلك تم تطوير العديد من النماذج والخوارزميات. ومن هذه النماذج يعد التصميم الأمثل المعتمد على تمثيل الشبكة بطبقة واحدة تجمع بين الوظائف الفيزيائية والمنطقية مهمة صعبة تم بحثها من قبل العديد من الباحثين [12, 14]. أدى النمو المتسارع لحجم حركة الإنترنت إلى ازدياد الحاجة إلى شبكات ذات سعات عالية والاعتماد على تقنيات جديدة ومنها تقنية تقسيم القنوات بالاعتماد على تخصيص الطول الموجي الكثيف DWDM [15] كما هو موضح في الشكل (1). **تسمح هذه التقنية بوجود مسارات ضوئية مختلفة عبر ليف واحد من الألياف الضوئية باستخدام أطوال موجية مختلفة.** وقد أصبح استخدام مثل هذه الشبكات شائعاً لدى شركات الاتصالات لأنها سمحت لهم بتوسيع سعة شبكاتهم دون وضع المزيد من الألياف. تحولت اليوم، DWDM إلى تكنولوجيا الشبكة المهيمنة في شبكات العمود الفقري الضوئية عالية السعة. **حيث أن تكلفة مسار الضوء في هذه الشبكات تتناسب مع طوله الفيزيائي،** وكذلك مع السعة التي يؤمنها المسار المحدد. ومن المعروف أن DWDM يدعم مجموعة من الواجهات القياسية عالية السعة (على سبيل المثال 1 أو 2.5 أو 10 أو 40 جيجا بت في الثانية) [6, 7, 13]. وكلما ارتفع معدل البت، انخفضت تكلفة الحزمة الترددية المستخدمة.

يمكن النظر إلى الشبكة ككل أنها مكونة من مستويين، حيث تشكل عُقد العملاء مع وصلات مسار الضوء هذه ما يسمى بالمستوى المنطقي الذي يعتمد في عمله على مستوى فيزيائي تحدده بشكل كلي البنية المادية لشبكات DWDM والتي تعتبر المستوى الفيزيائي. وتكمن المشكلة في هذه الشبكات في أن حدوث أي فشل في أي وصلة فيزيائية بين عقدتين سيؤدي إلى فشل كل التدفقات التي تستخدم مسارات تتضمن هذه الوصلة كما في حالة انقطاع ليف ضوئي بين مجمعين.

لجأت الكثير من الأبحاث إلى حل هذه المشكلة من خلال آلية الحماية $[1 + 1]$ ، أي لكل طلب يجب توفير مسارين منطقيين مستقلين مادياً [1817, 16]. تتناسب مثل هذه النماذج الحالات التي يتم فيها استخدام الشبكات الضوئية المتزامنة (SONET) أو شبكات البنية الرقمية الهرمية المتزامنة (SDH) نظرًا لأن كلا المعيارين لهما حماية $1 + 1$ كآلية حماية أصلية ولكنها تشكل هدراً للإمكانات في شبكات DWDM. لذلك فإن البحث عن خوارزميات لأمثلة عمل شبكات DWDM بالاعتماد على فصل المستوى المنطقي عن المستوى الفيزيائي يكتسب أهمية فائقة.

اتجهت في الآونة الأخيرة العديد من الأبحاث [19- 25] إلى استنباط طرق وخوارزميات لتشكيل شبكات مرنة متعددة المستويات تعتمد على:

- 1) تحديد الروابط التي سيتم تضمينها في الطبقة المنطقية والسعة المخصصة لكل منها؛
 - 2) تحديد مسار الضوء لكل ارتباط في شبكة البيانات؛
 - 3) توفير تحمل شبكة البيانات للفشل الناجم عن انقطاع التوصيل الفيزيائي بين عقدتين أو أكثر في شبكة النقل دون الإضرار بإنقاص قدرات الروابط المنطقية.
 - 4) تقليل تكلفة شبكة البيانات المصممة.
- وقد اعتمدت هذه الأبحاث في الحصول على الحلول المثالية على صياغة المسائل كمسألة برمجة خطية بالاعتماد على الأساسيات التالية:

1. وجود غاية أو هدف يراد الوصول إليه مثل تحقيق ربح أعظمي أو تحقيق كلفة أصغرية أو توفير في الوقت أو الجهد وغير ذلك. ويعبر عن ذلك بتابع رياضي خطي نسميه بتابع الهدف أو تابع الربح أو بتابع الخسارة.
 2. وجود عدد كبير من المتحولات أو المجاهيل التي يجب تحديد قيمها للوصول إلى الغاية المطلوبة، وتسمى هذه المتحولات بمتحولات القرار.
 3. وجود علاقات ارتباط خطية بين تلك المتحولات وتسمى هذه العلاقات بقيود المسألة.
- إذاً البرنامج الخطي هو استمثال optimization (تعظيم أو تقليل) دالة خطية، تحت قيود خطية. لوضع النموذج الرياضي الخطي يجب اتباع الخطوات التالية:
1. تحديد المتحولات التي يجب علينا إيجاد قيمها (متحولات القرار) وتمثيلها برموز جبرية.
 2. تحديد جميع القيود والعلاقات الممكنة التي تربط بين هذه المتحولات، ويعبر عن ذلك بمعادلات خطية أو مترجمات بحيث تكون هذه القيود خطية.
 3. تحديد تابع الهدف وتمثيله بتابع خطي بالنسبة للمتحولات، وتحديد ما إذا كان الهدف من المسألة تعظيم التابع الهدفي أو تقليله.

لحل مثل هذا النوع من المسائل لابد من إيجاد صيغة رياضية تعبر عن الشبكة وكيفية ارتباط عناصرها ببعضها البعض. لجأ الباحثون إلى تمثيل مثل هذه الشبكات من خلال الاعتماد على بناء نموذج IP عبر DWDM إما باستخدام نظرية البيان Graph theory لطبقتي IP و DWDM أو من خلال تشكيل الشبكة على شكل مكونات يناظر كل منها الآخر في البنية والوظيفة. ويعتبر النموذج المعتمد على نظرية البيان هو النموذج الأكثر قابلية لوصف العمليات التي تتم بالاعتماد على الشبكات المعرفة برمجيًا SDN، حيث يمكن النظر إلى الطبقتين، طبقة IP وطبقة DWDM على أنهما خادم وزبون حيث تلعب طبقة IP دور الزبون الذي يطلب إنشاء أو فصل الممر الضوئي من الطبقة الضوئية التي تلعب دور الخادم. وفي هذه الحالة يمكن فصل معلومات حالة الارتباط، وبروتوكول التوجيه والتشوير في طبقة IP عن تلك الخاصة بطبقة DWDM. وهذا النموذج مناسب لعمل الشبكات المقادة برمجيًا SDN في نموذج النظير، يتم استخدام مستوى تحكم موحد لكل من طبقات IP و WDM. ولهذا سنقوم باعتماد هذا النموذج لإيجاد الصيغ الرياضية المناسبة التي يمكن استخدامها لإيجاد الحلول المطلوبة.

اعتمد العديد من الباحثين على نموذج البيان متعدد المستويات لوضع نموذج رياضي ساعدهم في وضع خوارزميات لإنشاء مسارات مناسبة للتدفقات IP عبر شبكات DWDM [19,21,23]. ولكن عمومية الخوارزميات المستنبطة تجعل من استخدامها في الشبكات الصغيرة الحجم والتي تتكون من عدد محدود من العقد أمراً غير مناسب لكثرة المتحولات التي ستتعامل معها هذه الخوارزميات والتي لا تكون ضرورية لصغر حجم الشبكة وقلة عدد مكوناتها نسبياً.

قام الباحثون في [19] بحل هذه المشكلة بالاعتماد على البرمجة العددية من خلال وضع نموذج رياضي لوصف المسألة وحلها بالطرق المعروفة. ولكن هذا النموذج الرياضي وعلى الرغم من دقته فإنه يتطلب خطوات إضافية للحل مما يزيد من زمن إيجاد الحلول في الحالات الحرجة كحالات فشل وصلة فيزيائية أو أكثر وهذا يؤثر على جودة الاتصال وعلى تكامل المعطيات ويزيد من زمن التأخير الذي يؤثر سلباً على إمكانية تقديم خدمات الزمن الحقيقي سيما تلك التي تتطلب ألا يزيد زمن التأخير عن حدود دنيا معروفة. وبالتالي فإن مشاكل هذا النموذج ترتبط بزيادة القيود المفروضة على نموذج الشبكة والناجمة عن محاولة إيجاد تصور رياضي يشمل كل أنواع الشبكات والعقد وتنوع الوصلات.

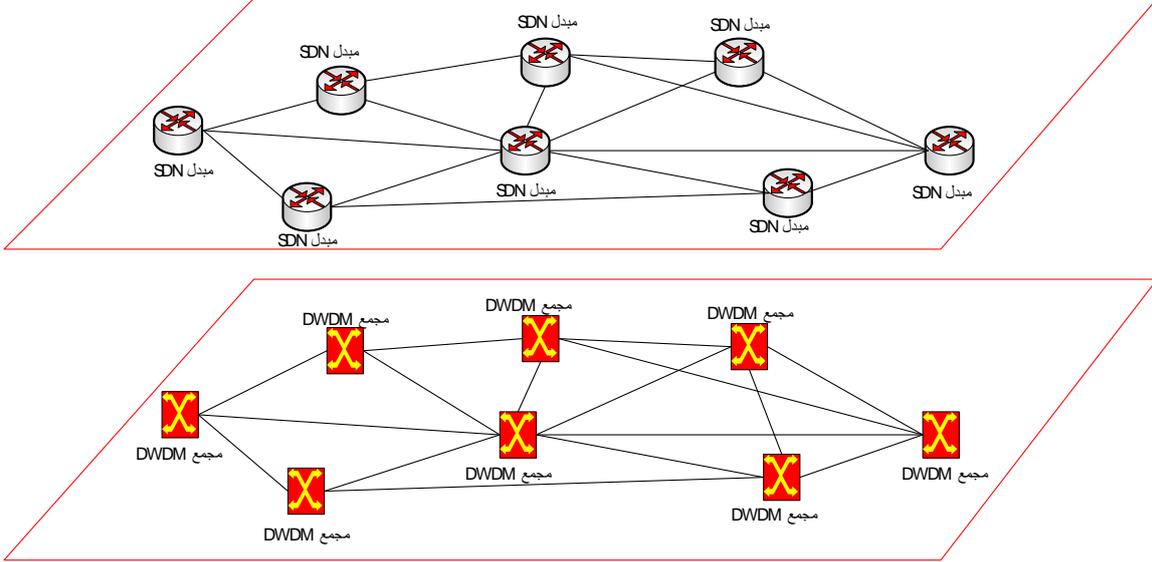
في كثير من الحالات فإن الأمر لا يتطلب تعقيداً في القيود وذلك بسبب حجم الشبكة الصغير نسبياً وصغر مساحة التغطية الذي يفترض وجود عدد من العقد أقل مما في حالة الشبكات الكبيرة وهذا الأمر يمكن تصوره في البلدان ذات المساحات الجغرافية غير الكبيرة، التي تسعى لإيجاد حلول شبكية لربط شبكات IP التقليدية لديها مع بعضها بالاعتماد على الشبكة الضوئية التي تشكل عموداً فقرياً يعمل كشبكة نقل بين هذه الشبكات. تعتمد هذه الحلول على دمج التقنيات الضوئية التقليدية مثل الشبكات التي تعتمد على التحكم الآلي بمسارات النقل مثل (ASON) Automatically Switched Optical Network مع الشبكات الأكثر تطوراً SDON من أجل القيادة المركزية لهذه المكونات بما يسمح بنقل الرزم على مستوى التطبيقات بين مستخدمي شبكات IP المختلف.

يتطلب هذا الأمر حلولاً تسمح، بالإضافة إلى مرونة الشبكة على مستوى شبكة النقل الضوئية، بتقديم ما يراعي متطلبات هذه التطبيقات والتقنيات المستخدمة فيها بما يؤمن الاستفادة من بنية هذه الشبكات والعناصر المكونة لها دون الحاجة إلى صرف النفقات الكبيرة لاستبدالها كلياً بشبكات متجانسة. مثل ظروف التشغيل هذه تتناسب البلدان التي لا تمتلك الموارد الفائضة لتنفيذ شبكات فائقة التعقيد لتتناسب حلولاً لمشاكل غير موجودة أصلاً في مثل هذه البلدان كما في البلدان ذات الامتداد الجغرافي الواسع والتنوع الكبير في طيف التطبيقات والتقنيات المستخدمة. لذلك سنعمد إلى تخفيف القيود الموضوعة في [19] وذلك كي يناسب النموذج المقترح ظروف عمل الشبكات غير الواسعة بما لا يؤثر على جودة تقديم الخدمات.

نموذج الشبكة IP عبر DWDM

يتم تمثيل الشبكة فيزيائياً ببيان غير موجه (V,H)، ويتم تمثيل الشبكة منطقياً ببيان آخر غير موجه (V,S). تشترك كلتا الطبقتين في نفس مجموعة العقد، أي أن العقدة الواحدة تكون غالباً مكونة من عقدة ضوئية هي مجمع DWDM يرتبط معها مباشرة بمبدل SDN كما هو موضح في الشكل (2). إن روابط الشبكة المنطقية هي روابط افتراضية يتم قبولها حسب الحاجة والطلب بينما روابط الشبكة المادية محددة وثابتة. تكون الحواف بسيطة في كلا البيانين، حيث لا يُسمح بالبيانات المتعددة في هذا النموذج. ولا بد من التأكيد هنا على أن هناك

حجم مرور محدد w_{mn} لكل زوج مختلف من العقد $m, n \in V$ يعبر عن حجم المعطيات التي يمكن للتدفق تمريرها عبر المسار المعني. كما أن هذه المسارات فريدة ومحددة في كل لحظة، ولا تتغير إلا في حالة فشل الارتباط، لتتبع مساراً آخر. وسنفترض من أجل التبسيط، أن حجم المرور المطلوب متماثل (أي $w_{mn} = w_{nm}$).



الشكل(2) بنية الشبكة المقترحة حيث كل مبدل SDN يرتبط بمجمع DWDM

لنفترض أن $\hat{C} = \{c, \dots, c_C\}$ هي مجموعة السعات الممكنة لمسار الضوء عبر الطبقة الفيزيائية وبالتالي تمثل سعة الروابط المنطقية. كل سعة $c \in \hat{C}$ لها تكلفة معروفة لكل مسافة a_c . **وسنعتبر لأسباب توفير أنه إذا كانت $c' < c$ فإن $(a_{c'}/c') > (a_c/c)$** نظرًا لأن كلا الرسمين البيانيين لهذا النموذج بسيطان وغير موجّهين، فسنعوم بالتعبير عن الروابط كأزواج من العقد. لكل رابط مادي (ij) له طوله d_{ij} .

عند عمل المتحكم في شبكة SDON فإن عليه أن يحدد ثلاثة أمور أساسية وهي سعة كل ارتباط منطقي، وكيف سيتم توجيه الارتباطات المنطقية عبر الوصلات الفيزيائية، وكيفية إعادة توجيه المعطيات عبر الوصلات الفيزيائية الأخرى في حال فشل إحدى الوصلات الفيزيائية المخصصة.

لصياغة وحل أي عملية تمرير للمعطيات عبر الشبكة لابد من التقيد بمجموعة من الشروط التي تفرضها طبيعة عمل الشبكة، والتي تحدد شروط عمل أي خوارزمية لحل المسائل المتعلقة بذلك. وسنلجأ في صياغة هذه الشروط إلى استخدام مجموعة من المتغيرات التي تصف عمل الشبكة المعنية. حيث سنستخدم المتغير المنطقي τ_{mn}^c للتعبير عن أن الارتباط المنطقي $(mn) \in S$ قد تم تعيينه بسعة $c \in \hat{C}$ وفي هذه الحالة يمكننا أن نعبر عن سعة الارتباط المنطقي (mn) على أنها:

$$\sum_{c \in \hat{C}} c \cdot \tau_{mn}^c \quad (1)$$

عند تحديد المسار الفيزيائي ستواجهنا مسألة تحديد ما إذا كان الارتباط المادي $(ij) \in H$ مستخدم أم لا لتنفيذ مسار الضوء (mn) . سنستخدم من أجل ذلك المتغير المنطقي o_{mn}^{ij} . وفي هذه الحالة إذا كان:

$$\sum_{c \in \hat{C}} \tau_{mn}^c = 1$$

فقد تم تعيين الارتباط المنطقي $(mn) \in S$ بسعة، وسيتم استخدامه في الشبكة المنطقية ويتطلب مسار ضوئي في الشبكة الفيزيائية.

عند فشل ارتباط فيزيائي (ij) فإن جميع الروابط المنطقية (mn) المرتبطة به والتي نعبر عنها من خلال إعطاء قيمة 1 للمتغير المنطقي $o_{mn}^{ij} = 1$ تفشل أيضاً. أي أن على المتحكم تأمين ممر فيزيائي بديل، وهنا من البديهي أن الحماية الوحيدة المتوفرة في هذا النموذج ضد الفشل الفيزيائي تكون نتيجة احتفاظ المتحكم بطلبات الروابط المنطقية وسعيه لتأمين ارتباط فيزيائي بديل في هذه الحالة، أي بتعبير آخر تتوفر الحماية من خلال الطبقة المنطقية. وفي هذه الحالة فإن $o_{mn}^{ij} = 1$ هو متغير منطقي يشير إلى ما إذا كان الارتباط المنطقي $(mn) \in S$ سيتم استخدامه أم لا، لتوجيه طلب حركة المرور $g_{rs} > 0$ ، في ظل فشل الارتباط المادي $(ij) \in H$. وقد عمدنا توخياً لسهولة القراءة إلى الإشارة إلى الروابط المنطقية في الموضع الأيمن السفلي، وللروابط الفيزيائية في الموضع الأيمن العلوي ولطلبات النقل في الموضع الأعلى الأيسر.

إن مجموع السعات المخصصة لكل ارتباط منطقي هو 1 على الأكثر، ويمكن أن يكون 0 إذا كان الارتباط لن يتم استخدامه، وهذا يمكننا التعبير عنه بالعلاقة:

$$\sum_{c \in \hat{C}^v} \tau_{mn}^c \leq 1 \forall (mn) \in S \quad (2)$$

الآن إذا تم تخصيص أي رابط منطقي $(mn) \in S$ بسعة 1 $\sum_{c \in \hat{C}^v} \tau_{mn}^c = 1$ فيجب أن يكون هناك رابط واحد منطقي فقط صادر، أو وارد، فعليا يستخدم مسار الضوء.

$$\sum_{j/(mj) \in H} o_{mn}^{mj} = \sum_{c \in \hat{C}} \tau_{mn}^c \forall (mn) \in S \quad (3)$$

$$\sum_{i/(in) \in H} o_{mn}^{in} = \sum_{c \in \hat{C}} \tau_{mn}^c \forall (mn) \in S \quad (4)$$

سنعبر عن ارتباطات الوصلات المنطقية والفيزيائية بالمتغير المنطقي $\hat{\alpha}_{mn}^i$. يتم تحديد قيمة هذه المتغيرات لكل مجموعة من الروابط المنطقية $(mn) \in S$ والعقد المادية $i \in V$ على الشكل التالي:

$$\sum_{j/ij \in H} o_{mn}^{ij} = 2\hat{\alpha}_{mn}^i \forall (mn) \in S, \forall i \in V, i \neq m, i \neq n \quad (5)$$

وهذا يمكن المتحكم من ضمان توازن التدفق من خلال توجيه مسارات الضوء من خلال العقد المتبقية -غير الطرفية. من الضروري في مثل هذه الشبكات أن يتم ضمان أن ينتقل الضوء عبر نفس المسارات المخصصة ذهاباً وإياباً، وهنا نعبر عن ذلك بالعلاقة:

$$o_{mn}^{ij} - o_{mn}^{ji} = 0 \forall (m, n) \in S, \forall (i, j) \in H \quad (6)$$

جميع هذه المتغيرات تأخذ قيمها بالترابط فيما بينها وأن المتغيرات المرتبطة بذلك تأخذ قيمة منطقية وهي مترابطة فيما بينها أي أن:

$$\tau_{mn}^c, o_{mn}^{ij}, \hat{\alpha}_{mn}^i \in \{0, 1\} \forall (m, n) \in S, \forall (i, j) \in H, \forall c \in \hat{C}, \forall i \in V \quad (7)$$

جميع الشروط التي تم التعبير عنها من 2 إلى 7 هي شروط متعلقة بقابلية استخدام الطبقة الفيزيائية. وهناك أيضاً شروطاً ومحددات لاستخدام الطبقة المنطقية عند تشكيل المسارات بين النهايات ويمكن صياغتها بحيث أن استخدام أي وصلة فيزيائية يجب أن يضمن أن مرور المعطيات عبرها يجب أن يكون **بمعدل** أقل أو يساوي سعة الوصلة وهذا يضمن التشكيل الصحيح للمسارات. وهذا يضمن أيضاً أنه من أجل أي خطأ فيزيائي $(ij) \in H$ ، فإن تحديد

التوجيه المرتبط به عبر الشبكة المنطقية يحافظ على كون السعة المطلوبة لحركة المرور المجتمعة عبر وصلة فيزيائية أدنى من سعة الوصلة وهو ما عبرنا عنه باستخدام المتراحة.

$$\sum_{rs:w_{rs}>0} w_{rs} \cdot {}^{rs}g_{mn}^{ij} \leq \sum_{c \in \hat{C}} c \cdot \tau_{mn}^c \forall (mn) \in S, \forall (ij) \in H \quad (8)$$

تتشابه بقية الشروط مع الشروط الموضوعة على الطبقة الفيزيائية من حيث المعنى والدلالات مع ملاحظة أن عدد حواف البيان، المنطقي يمكنها أن تكون أكبر من عدد حواف البيان الفيزيائي، أي أن عدد الوصلات المنطقية يمكن أن يكون أكبر من عدد الوصلات الفيزيائية. إن وجود الدلالة إلى يسار المتغيرات من الأعلى يعني أن الروابط المنطقية مرتبطة أساساً بالسعات المتوفرة.

$$\sum_{n/(rn) \in S} {}^{rs}g_{rn}^{ij} = 1, \quad \forall w_{rs} > 0, \forall (ij) \in H \quad (9)$$

$$\sum_{m/(ms) \in S} {}^{rs}g_{ms}^{ij} = 1, \quad \forall w_{rs} > 0, \forall (ij) \in H \quad (10)$$

$$\sum_{n/(mn) \in S} {}^{rs}g_{mn}^{ij} = 2 \cdot {}^{rs}\hat{\beta}_m^{ij} \forall w_{rs} > 0, \forall (ij) \in H, \forall m \in V, m \neq r, m \neq s \quad (11)$$

$${}^{rs}g_{mn}^{ij} - {}^{rs}g_{nm}^{ij} = 0 \forall w_{rs} > 0, \forall (mn) \in S, \forall (i, j) \in H \quad (12)$$

$${}^{rs}g_{mn}^{ij}, {}^{rs}\hat{\beta}_m^{ij} \in \{0, 1\} \forall w_{rs} > 0, \forall (mn) \in S, \forall (i, j) \in H, \forall m \in V \quad (13)$$

كما نلاحظ أن المتغيرات ${}^{rs}\hat{\beta}_m^{ij}$ متماثلة مع $\hat{\alpha}_{mn}^i$ ؛

وقبل المضي قدماً، يجب أن نلاحظ أن مجموعتي الشروط المذكورة أعلاه غير مستقلة عن بعضها إذ تعتمد الروابط المنطقية في هذه الحالة على كيفية توجيه مسارات الضوء في الطبقة المادية. على وجه التحديد، إذا كان الارتباط المنطقي (mn) يستخدم وصلة فيزيائية (ij) لتنفيذ مسار الضوء الخاص به، فلا يمكن استخدام هذا الارتباط المنطقي لتوجيه أي نفق في سيناريو الفشل للوصلة الفيزيائية (ij).

الآن من الضروري أن نصوغ العلاقة التي تمنع المتحكم من استخدام (mn) لتوجيه أي حركة مرور، ${}^{rs}g_{mn}^{ij} = 0$ ، $\forall rs: w_{rs} > 0$ ، في أي سيناريو فشل يؤثر على هذا الارتباط (عندما $o_{mn}^{ij} = 1$) وذلك كالتالي:

$${}^{rs}g_{mn}^{ij} \leq 1 - o_{mn}^{ij} \forall rs: w_{rs} > 0, \quad \forall (mn) \in S, \forall (i, j) \in H \quad (14)$$

يمكننا الآن العمل على إنقاص مجموع كلفة كل ممر منطقي. وفقاً للسعة التي تم تعيينها للوصلات المنطقية، هناك تكلفة مرتبطة بكل مسافة (a.c). ووفقاً لكيفية توجيه مسار الضوء المقابل على الطبقة الفيزيائية، يكون له طول مرتبط $\sum_{(ij) \in H} d_{ij} o_{mn}^{ij}$ يعبر عن كلفة الوصلة المنطقية. كما أن مجموع كلف جميع الوصلات المنطقية الداخلة في الحل يشكل الكلفة الإجمالية للحل والذي نعبر عنه بالعلاقة:

$$\sum_{(mn) \in S} \left(\sum_{c \in \hat{C}} a_c \tau_{mn}^c \right) \left(\sum_{(ij) \in H} d_{ij} o_{mn}^{ij} \right) = \sum_{(mn) \in S, (ij) \in H, c \in \hat{C}} a_c d_{ij} \cdot \tau_{mn}^c o_{mn}^{ij} \quad (15)$$

من أجل التعبير بشكل أدق يعبر خطياً عن التوافق بين الوصلات المنطقية والوصلات الفيزيائية المستخدمة لخدمتها **فسنفوم** بتعديل الشروط الموضوعة إلى شكل يعبر عن القيمة حيث سنستخدم المتغير الحقيقي ${}^c\gamma_{mn}^{ij}$ بدلاً من $\tau_{mn}^c o_{mn}^{ij}$. الآن ونتيجة لكون $\tau_{mn}^c o_{mn}^{ij}$ هي أيضاً متغير منطقي. **وسنحصل** على مجموعة الشروط التالية:

$$\min \sum_{\substack{(mn) \in S \\ (ij) \in H \\ c \in \hat{C}}} a_c d_{ij} \cdot {}^c \gamma_{mn}^{ij} \quad (16)$$

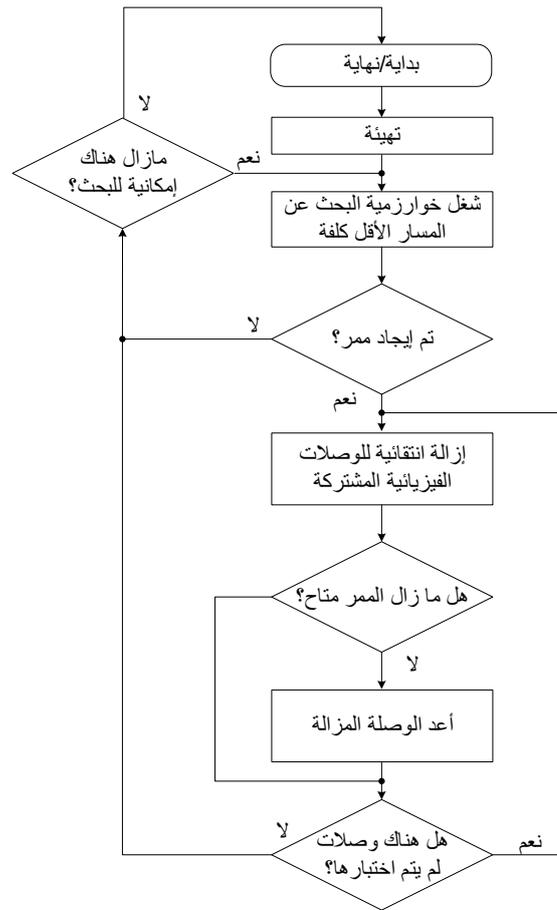
$${}^c \gamma_{mn}^{ij} \geq \tau_{mn}^c + o_{mn}^{ij} - 1 \quad \forall (mn) \in S, \forall (i, j) \in H, \forall c \in \hat{C}. \quad (17)$$

$${}^c \gamma_{mn}^{ij} \geq 0 \quad \forall (mn) \in S, \forall (i, j) \in H, \forall c \in \hat{C}. \quad (18)$$

وبما أن ${}^c \gamma_{mn}^{ij}$ يتم ضربه بثابت موجب في مسائل إيجاد القيمة الصغرى، فسيأخذ أدنى قيمة له كلما كان ذلك ممكناً. ستكون هذه القيمة صفراً حسب الشرط الموجود في (18).

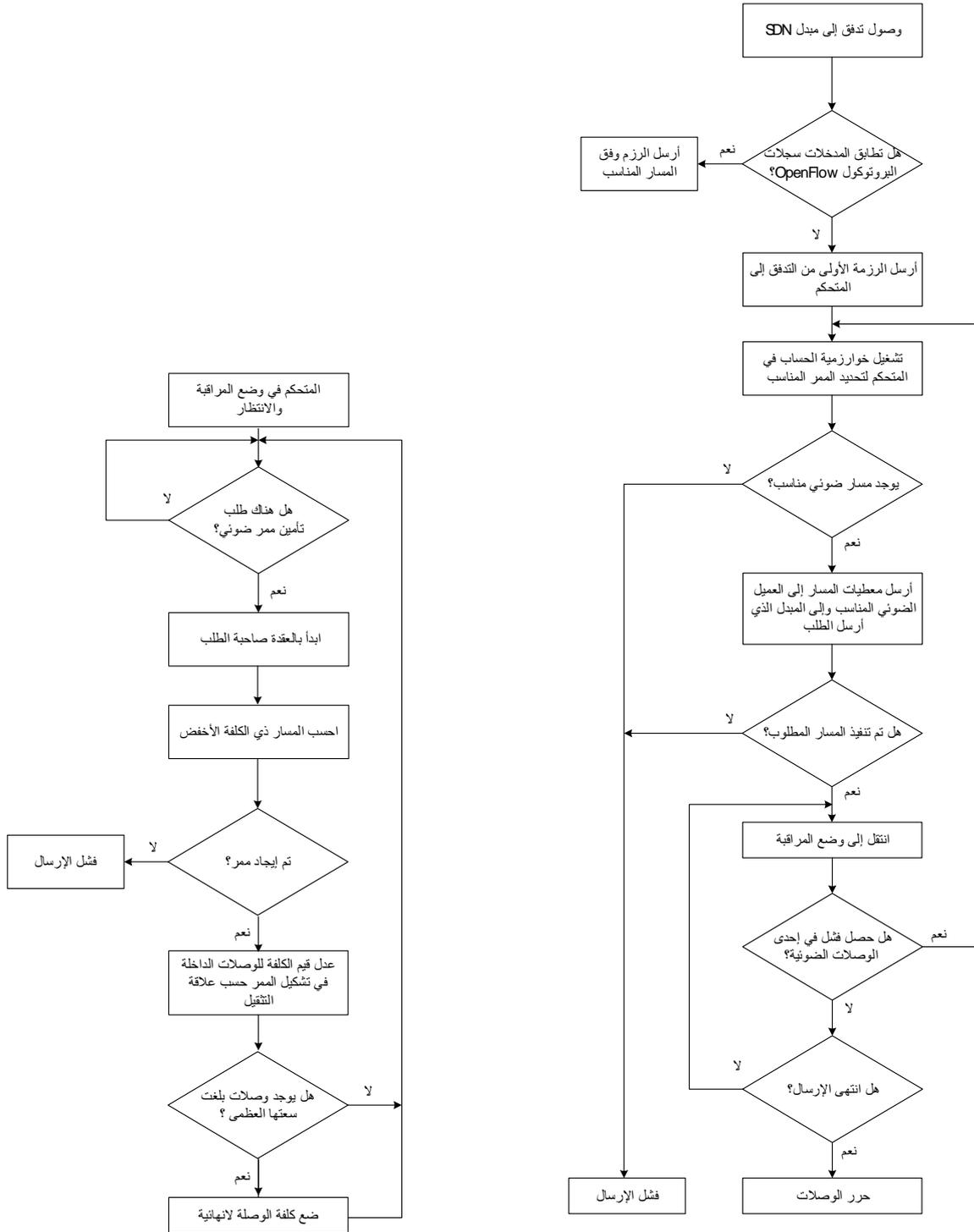
الاستثناء الوحيد هو عندما تكون قيمتا o_{mn}^{ij} و τ_{mn}^c كلاهما 1، وفي هذه الحالة يجب أن تكون قيمة ${}^c \gamma_{mn}^{ij}$ أيضاً 1 للحفاظ على التوافق وهذا ما يضمنه الشرط (17). تسمح لنا صياغة المسألة بالشكل السابق أن نتصور الحل الممكن ليس من خلال إيجاد جواب لمسألة البرمجة العددية فهي في مثل هذه المواضيع لا تمتلك حلاً واحداً صريحاً ومباشراً ولكن الصياغة تسمح لنا بالاعتماد عليها أن نطرح خوارزمية يمكن تجريبها أكثر من مرة ومقارنة النتائج بالخوارزميات المستخدمة في هذا المجال للوصول إلى الحل الأفضل بما يحقق مجموعة المتغيرات والشروط الموضوعية أعلاه. وهو ما تم استخدامه عند صياغة الخوارزمية.

تعتمد الخوارزمية المقترحة على استخدام شروط الكلفة والسعة للوصلات في حساب المسار ذي الكلفة الأقل. يفرض المتحكم الطريقة العامة التي يعمل عليها من أجل إيجاد المسار الأفضل ولكنه يسمح بتعديل طريقة الحساب والآلية التي تتم من خلالها، أي أنه يسمح بتغيير خوارزمية الحساب. يبين الشكل (3) المخطط التدفقي للطريقة العامة التي يتم استخدامها في المتحكم لحساب تحديد المسار وهي متبعة في العديد من الدراسات والأبحاث ومنها [19]. وقد تم تعديل خوارزمية البحث عن المسار الأفضل المستخدمة في المخطط لتعمل وفق الشروط والمتغيرات المناسبة للنموذج الرياضي.



الشكل (3) المخطط التدفقي للطريقة العامة التي يتم استخدامها في المتحكم لحساب المسار

ويبين الشكل (4-أ) خوارزمية الحساب التي تم اقتراحها والتي تعتمد بدورها على آلية جديدة لحساب كلفة المسار، كما في الشكل (4-ب)، تأخذ بالاعتبار شروط عمل الشبكة من حيث قيود السعة والكلفة وتوازن الحمل في الممرات المختلفة.



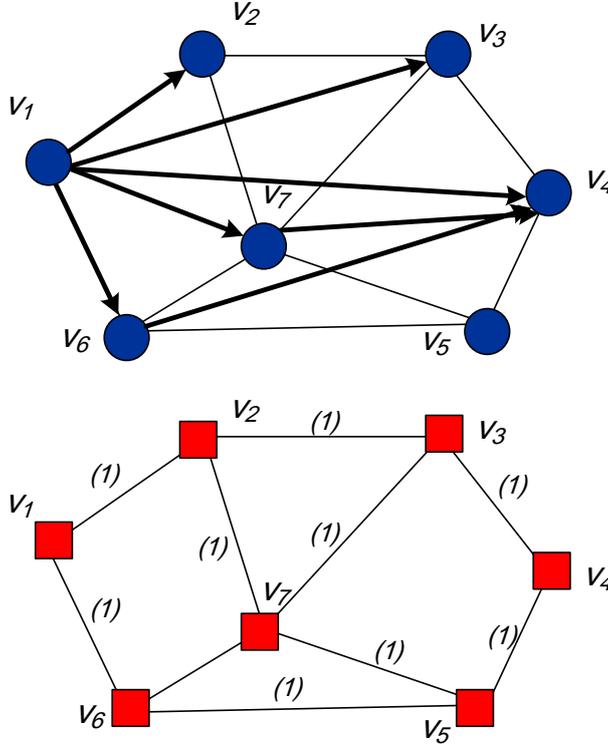
(ب) خوارزمية الحساب في المتحكم لتحديد الممر المناسب

(أ) خوارزمية تحديد الممرات

الشكل (4) خوارزمية الحساب التي تم اقتراحها لتحديد الممرات

ولتوضيح كيفية قيام المتحكم بتحديد الممر الفيزيائي الأفضل للربط المنطقي بين العقدة المرسله والعقدة الهدف، سنعمد شبكة مؤلفة من أربعة عشر عقدة، كما هو مبين في الشكل(5). وسنفترض أن المتحكم تلقى طلبا للربط وفق الوصلات المنطقية الآتية: V12, V17, V16, V13, V64, V74, V14 على التوالي اعتبارا من اليسار.

سنفترض أن قيمة جميع الوصلات في البداية متساوية وتساوي الواحد، على الرغم من أن ذلك غير مؤكد في التطبيقات العملية بالاعتماد على العلاقات 16, 17, 18 ولكن هذا الفرض يبسط لنا فهم آلية عمل الخوارزمية دون أن يؤثر عمومية الاستنتاج.



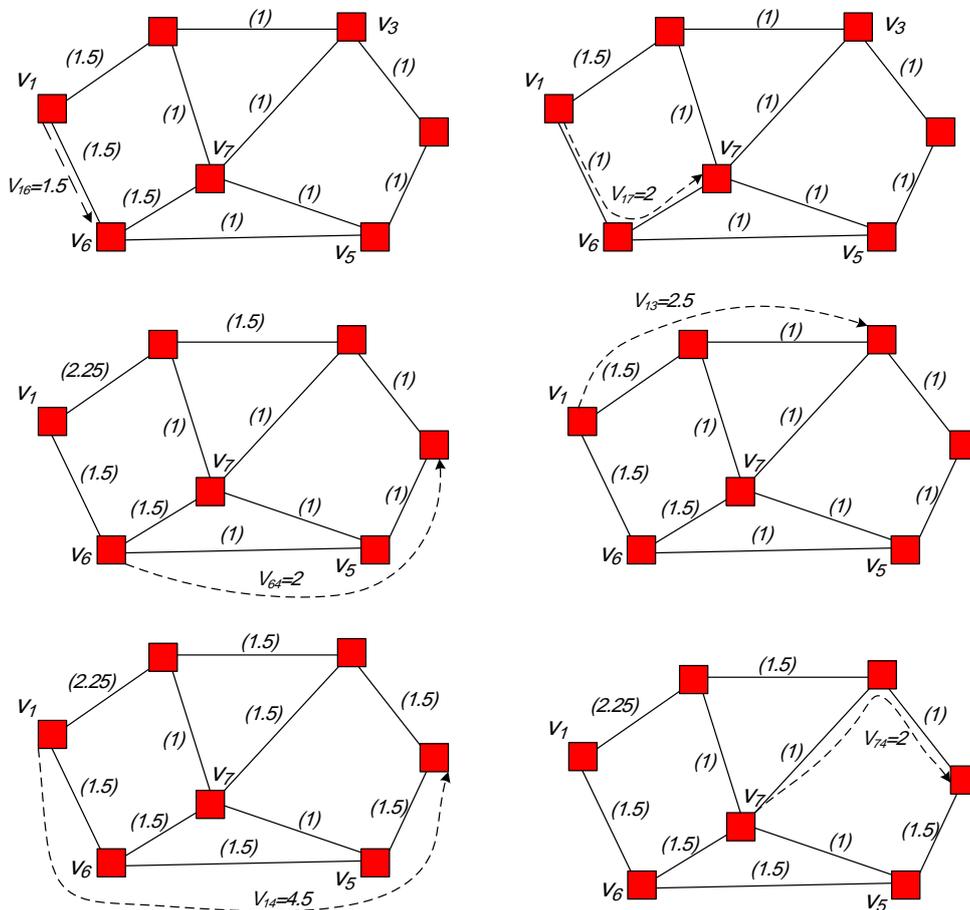
الشكل (5) شبكة اختبار مؤلفة من أربعة عشر عقدة

سيبدأ المتحكم بتحديد الممر الفيزيائي بين العقدتين 1 و 2 أي v_{12} . وباعتبار أنه لا يوجد أي طلب مسبق يستخدم حاليا هذه الوصلة فإن كلفة الممر الفيزيائي المباشر من 1 إلى 2 هي (1). يمكن حساب كلفة الاستخدام التالي لهذه الوصلة فيما ماتزال مشغولة بالطلب السابق وفقا للعلاقات السابقة ولكن وللسهولة سنقوم بحسابها وفق علاقة خطية $d_{ij} = f * q_{ij}$ ، حيث d_{ij} هي الكلفة الجديدة للممر بين العقدتين i و j و q_{ij} هي الكلفة الحالية للوصلة وقت الحساب و f هي معامل يعبر عن مدى مشغولية الوصلة ويكون عادة أكبر من 1 ليعبر عن الازدياد المستمر للمشغولية.

حين يتلقى المتحكم طلبا لتحديد المسار بين 1 و 7 فالمرين المرشحين مبدئيا وفق للتوقع المبدئي لنا هما $v_1 - v_2 - v_7$ و $v_1 - v_6 - v_7$. الوصلة بين v_1 و v_2 ستكون في هذه الحالة ذات كلفة $1.5 * 1 = 1.5$ أي أن كلفة المسار عبر العقدة 2 ستكون 2.5 بينما ستكون مساوية لـ 2 عبر العقدة 6 أي أن المتحكم سيختار $v_1 - v_6 - v_7$ لأن كلفته ستكون هي الأقل وفقا للحساب المباشر. الآن حين يتلقى المتحكم طلبا لتمرير تدفق بين العقدتين 1 و 6 فالمرر المقترح سيكون هو الممر المباشر بين 1 و 6 ولكن كلفته ستكون 1.5 لأنه مستخدم حاليا لتمرير التدفق بين 1 و 7.

بفرض أن المتحكم قد تلقى طلبا لتحديد مسار تدفق جديد بين 1 و 3، فالمسارات المقترحة ستكون $v_1 - v_2 - v_3$ و $v_1 - v_6 - v_3$ إضافة إلى **ممرات** أخرى لن ندخلها في التوضيح لأنه تظهر بشكل بديهي أنها أعلى تكلفة. كلفة $v_1 - v_2 - v_3$ هي مجموع كلفة الوصلات المشكلة للممر بعد تحديث حساب الكلفة،

كلفة الوصلة بين 1 و 2 بعد تحديثها لتصبح 1.5 لأنها ستستخدم للمرة الثانية مضافا إليها كلفة الوصلة بين 2 و 3 التي تستخدم للمرة الأولى أي أن كلفة الممر ستكون 2.5. وكذلك ستكون كلفة الممر $v_3 - v_6 - v_1$ مساوية للكلفة بين 1 و 6 و المساوية لـ 1.5 وبين 6 و 7 والتي ستكون 1.5 أيضا لأنها ستستخدم للمرة الثانية مضافا إليها كلفة الوصلة التي ستستخدم للمرة الأولى أي 1 وستكون كلفة الممر مساوية لـ 4. أما كلفة الممر $v_1 - v_2 - v_7 - v_3$ فتكون 3 وفقا لنفس طريقة الحساب وبالتالي سيحدد المسار $v_1 - v_2 - v_3$ لتمرير التدفق المطلوب. حين يتلقى المتحكم طلبا لتحديد مسار تمرير التدفق $v_6 - v_4$ فسيختار الممر فسيجد مجموعة ممرات أقصرها سيكون $v_4 - v_5 - v_6$ بكلفة مساوية لـ 2. وكذلك حين تلقي طلبا لتحديد مسار التدفق بين العقدتين 7 و 4 فإن الممر $v_7 - v_4 - v_5$ ذو كلفة مساوية لـ 2.5 بينما تكون كلفة الممر $v_4 - v_3 - v_7$ مساوية لـ 2 لذلك سيختار هذا الممر. الآن حين ورود طلب لتحديد مسار التدفق من 1 إلى 4 مع بقاء جميع التدفقات على حالها فإن عدد الممرات سيكون أكبر مما هو عليه في الحالات السابقة. ويبين الشكل (6) الخطوات الحسابية التي يقوم بها المتحكم لتحديد المسار ذي الكلفة الأقل خطوة بخطوة وفق ما تم توضيحه أعلاه.



الشكل (6) الخطوات الحسابية التي يقوم بها المتحكم لتحديد المسار ذي الكلفة الأقل

يقوم هذا التحليل على تصور شبكة البيانات كشبكة مترابطة ومتراصة مع الشبكة الفيزيائية والتي تمثل شبكة النقل الضوئية في حالتنا هذه. تنشأ طلبات تمرير المعطيات بين العقد في شبكة البيانات، ويتم توجيهها فيها، وهذا يتطلب تحديد السعات المطلوبة في شبكة البيانات. إن تحديد السعات اللازمة لتأمين التوجيه في شبكة البيانات يؤدي إلى تحديد ما هو مطلوب من الطبقة الفيزيائية.

5. اختبار الخوارزمية المقترحة وتقييمها

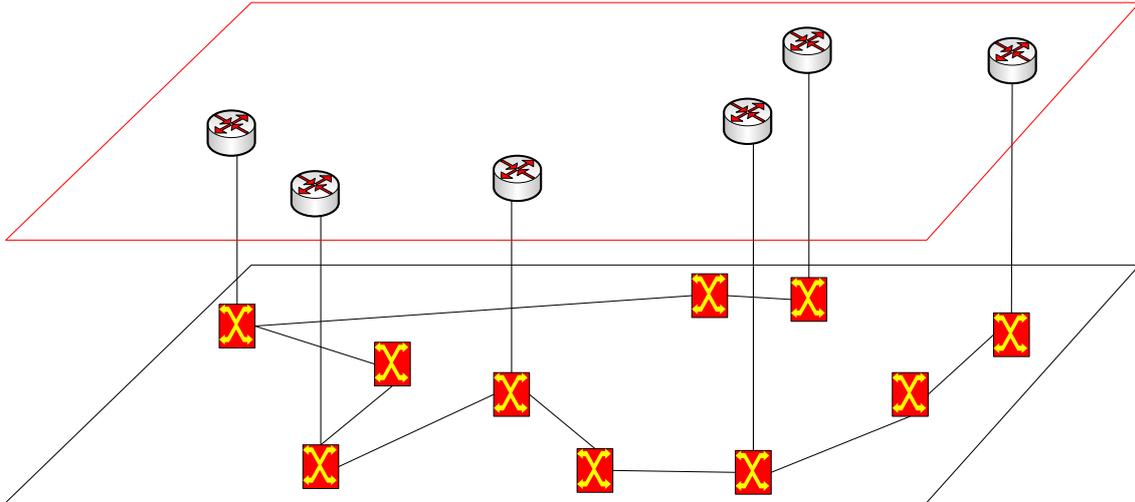
قمنا باختبار الخوارزمية التي حصلنا عليها من أجل مجموعة من البارامترات وهي: أفضل زمن لإنشاء المسار، وأفضل زمن لإنعاش الشبكة في حال فشل مسار أو أكثر، وكذلك من أجل نسبة حجب التدفقات التي يمكن أن تحصل حين تطبيق كل من الخوارزميات مع ازدياد عدد التدفقات التي يطلب خدمتها، وذلك باعتبار أن كل تدفق يحتوي على عدد غير محدود من رزم الإيثرنت التي تحتوي على بيانات عشوائية مولدة بشكل عشوائي من قبل البرنامج المستخدم لغرض الدراسة.

تم تشغيل السيناريوهات السابقة باستخدام التجهيزات والبرمجيات التالية:

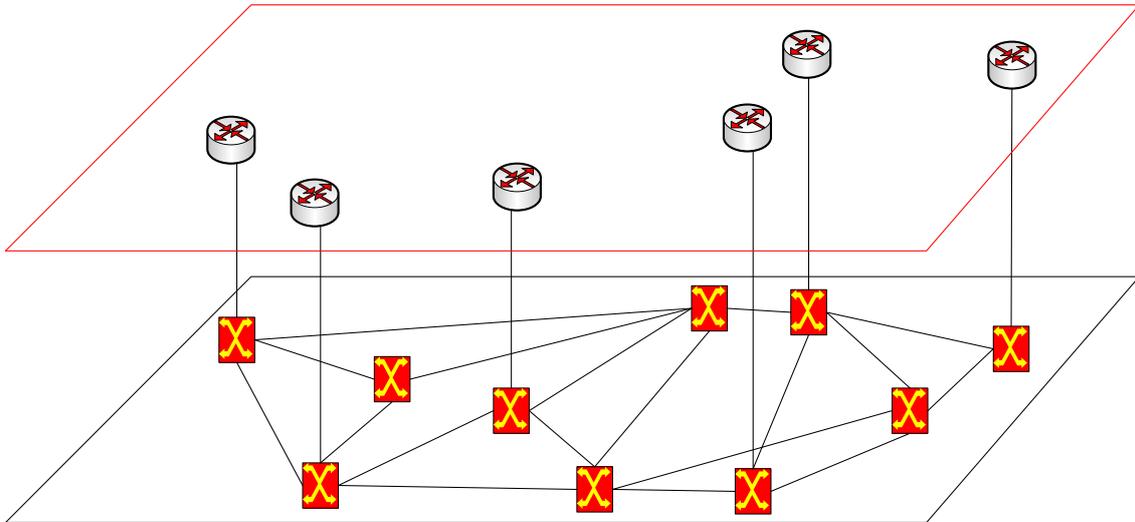
لابتوب HP Notebook 15-da2007ne مزود بمعالج من الجيل العاشر من شركة إنتل Core i5-10210U، وذاكرة عشوائية 4 جيجا بايت DDR4 بسرعة 2666 جيجا هرتز نظام التشغيل Windows 10 64bits و VirtualBox VM الإصدار 6.0.12، تحت إدارة VirtualBox، تم تثبيت أنظمة تشغيل الضيف التالية: Mininet Emulator الإصدار 2.2.2 على نظام التشغيل Ubuntu 18.04 LTS 64bit وكذلك بالعمل في بيئة ONOS 1.16.0.

الحالة الأولى اختبار الخوارزمية من أجل أفضل زمن لإنشاء المسار: تم ذلك باستخدام بنية شبكية مكونة من 10 عقد هي عبارة عن مجموعات ضوئية من النوع ROADM، ست منها فقط مزودة بإمكانية الدخول إلى الانترنت من خلال مبدل SDN. وقد تم تجهيز الوصلات بين هذه العقد كشبكة معشقة جزئياً. كما هو مبين في الشكل (7)، واعتبرنا أن كل الوصلات تمرر المعطيات في الاتجاهين وأنه لا يوجد أي قيود على المنافذ. نبدأ بدون أي مسارات مسبقاً أي أن الشبكة يتم تشغيلها وتجهيزها وإقلاع التجهيزات فيها ثم يتم البدء بإرسال الطلبات بين مراكز المعطيات وبين المراكز الطرفية. ومن أجل الحصول على نتائج في ظروف تحاكي الواقع فقد تم افتراض أن طلبات الخدمة تصل احتمالياً وفق عملية بواسون، وهو ما يناسب مثل هذه الحالات من العمل الشبكي.

قمنا بترتيب الشبكة بحيث تكون سعة الوصلات 100 جيجابت/ثانية وبشكل يسمح بمشاركة الوصلات بين طلبات مختلفة. تمت تهيئة المراكز الطرفية بحيث تعمل وفق سيناريوهات مختلفة تختلف عن بعضها بمعدلات الإرسال التي تتطلبها طلبات الإرسال. بحيث ينتج عن السيناريو الأول 10Gbps بينما ينتج عن السيناريو الثاني 20Gbps.



الشكل (7) بنية شبكية مكونة من 10 عقد ضوئية ROADM، ست منها فقط مزودة بإمكانية الدخول إلى الانترنتن خلال مبدل SDN تم اختيار الشبكة في حال استخدام الطريقة المقترحة في هذا البحث، وكذلك من أجل الطريقة المطبقة في [19] ومراقبة أدائها في الحالتين للحصول على متوسط زمن إنشاء المسار. يتم حساب متوسط زمن إنشاء المسار بحساب الزمن اللازم للوصول لكل تدفق مقسوما على عدد التدفقات المطلوب تمريرها، وذلك انطلاقا من أن الشبكة لا تحتفظ بأي معطيات عن أي مسار في لحظة تشغيلها. قمنا بالحساب من أجل مجموعة من التشكيلات الشبكية ابتداء من التشكيل المبين في الشكل (7) وانتهاء بالتشكيل المبين في الشكل (8).



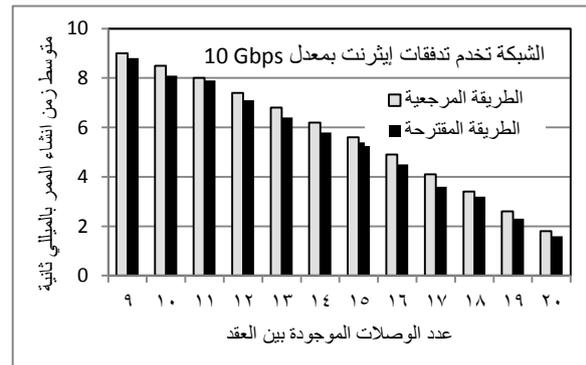
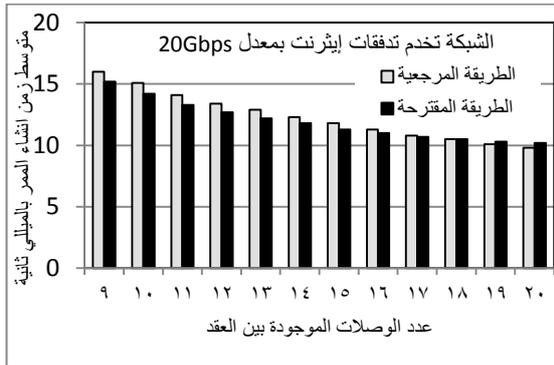
الشكل (8) بنية شبكية مكونة من 10 عقد ضوئية ROADM، ست منها فقط مزودة بإمكانية الدخول إلى الانترنتن خلال مبدل SDN، ولكن مع زيادة عدد الوصلات بين العقد إلى 20.

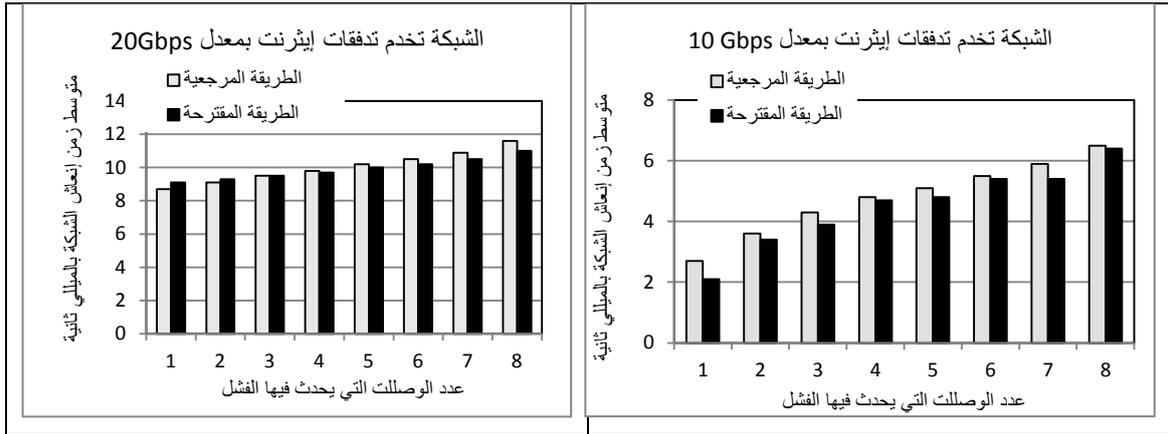
أي أننا ابتدأنا من حالة وجود 9 وصلات تسمح بوجود اتصال في حده الأدنى بين العقد وقمنا في كل مرة بزيادة وصلة بين عقدتين حتى الوصول إلى حالة وجود 20 وصلة. ومن أجل كل منها قمنا بحساب متوسط زمن إنشاء المسار من أجل كل من الخوارزميتين المرجعية والمقترحة. وقد تم الحصول على النتائج المبينة في الشكل (9) والتي تبين أفضلية الخوارزمية المقترحة وقد كانت الأفضلية واضحة سيما عند وجود عدد أقل من الوصلات بين العقد.

الحالة الثانية من أجل أفضل زمن لإنعاش الشبكة في حال فشل مسار أو أكثر: تم تشغيل الشبكة انطلاقاً من البنية التي تم الوصول إليها في الاختبار السابق، أي حالة وجود 20 وصلة بين العقد وذلك من أجل تدفقات 10 و 20 جيجابايت على التوالي. قمنا باصطناع فشل في إحدى الوصلات ومراقبة أداء الشبكة وحساب زمن الإنعاش من أجل كل من الخوارزميتين، وهو الزمن الذي تستغرقه الشبكة لإعادة إنشاء المسارات البديلة التي يتم إتباعها لإرسال المعطيات بعد فشل إحدى الوصلات. كررنا نفس السيناريو ولكن مع اصطناع فشل في وصلتين ثم من أجل ثلاثة وهكذا وصولاً إلى وجود فشل في 8 وصلات بحيث لا يؤدي أي فشل منها إلى تقسيم الشبكة إلى شبكتين منفصلتين. وبينت النتائج أيضاً أفضلية الخوارزمية المقترحة من أجل هذا العدد المحدود من العقد والذي يوافق حالة الشبكات غير الكبيرة.

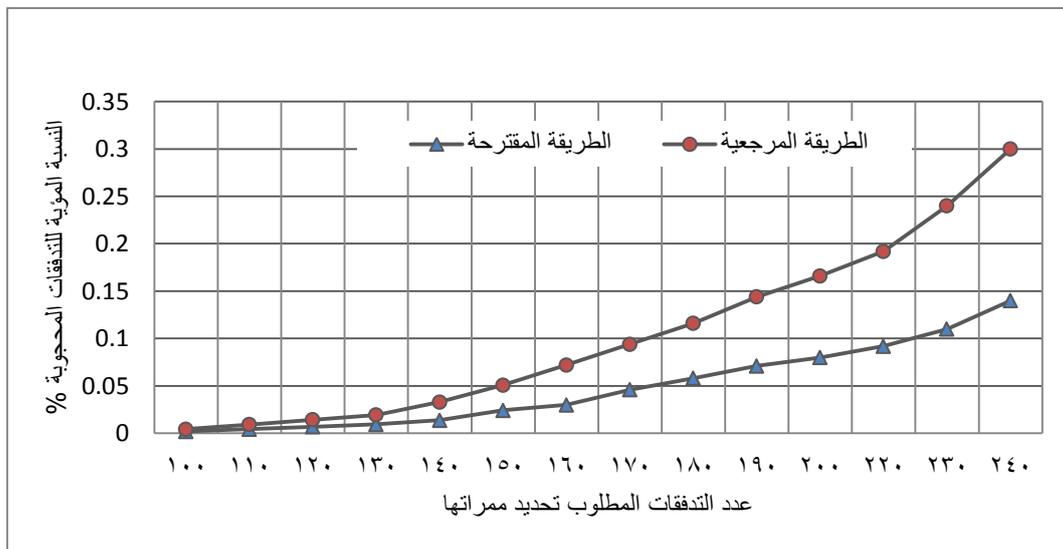
من أجل نسبة حجب التدفقات مع ازدياد عدد التدفقات: يعتمد هذا السيناريو على إنشاء شبكة مكونة من 6 عقد ضوئية كلها مزودة بإمكانات التعامل مع شبكة IP وتم بناء هذه الشبكة على شكل شبكة معشقة بشكل كامل أي أن كل عقدة لديها إمكانية الاتصال مع جميع العقد وهذا يؤمن لنا وجود 15 وصلة ضوئية متاحة بين العقد، كل وصله منها تعمل بطريقة DWDM وتتيح استخدام 16 طول موجة مختلف كل منها قادر على حمل المعطيات بمعدل 10 Gbps في السيناريو الأول و 20 Gbps في السيناريو الثاني. تم اختبار احتمالية حجب التدفقات وذلك على اعتبار أن التدفق الذي لا تتم خدمته خلال 15 ميلي ثانية سيتم حجبه. وقد تم اختيار هذا الرقم لأنه يناسب أغلب تطبيقات الانترنت التي تستخدم البنية الضوئية.

تم توليد التدفقات على شكل طلبات Ethernet بمعدلات 2.5 Gbps وزيادة عدد هذه التدفقات تدريجياً. وقد تم أخذ عدد التدفقات التي تم حجبها في كل مرة وحساب نسبة هذه التدفقات في كل مرة ومن ثم تكرار التجربة لعشر مرات وحساب القيمة المتوسطة لنسبة حجب هذه التدفقات ورسم المخطط الذي يوضح تغير احتمالية حجب التدفقات مع ازدياد عدد التدفقات. ويبين الشكل (10) النتائج التي تم الحصول عليها والتي تبين أفضلية الخوارزمية المقترحة من أجل الشبكات غير الكبيرة.





الشكل (9) متوسط زمن إنشاء المسار من أجل كل من الخوارزميتين المرجعية والمقترحة مع زيادة عدد الوصلات بين العقد في كل مرة



الشكل (10) مخطط يوضح تغير احتمالية حجب التدفقات مع ازدياد عدد التدفقات من أجل كل من الخوارزميتين المرجعية والمقترحة

بالمقارنة بين نتائج البحث والنتائج الموجودة في الدراسة المرجعية [20] والتي اقترحت خوارزمية الوصلة المباشرة (DFL) Direct Fiber Link من حيث التأخير الزمني في تأسيس الوصلة، وبالأخذ لعين الاعتبار نفس عدد الوصلات والعقد المدروسة نجد أن الخوارزمية المقترحة حققت نتائج أفضل وتأخير زمني أقل حيث أنه من أجل 10 عقد و 10 وصلات حصلنا على زمن مقداره 8ms تقريباً عند سرعة نقل 10Gbps بينما أفضل زمن حققته خوارزمية DFL كان 10ms من أجل نفس عدد العقد المدروس.

6. الاستنتاجات

1. تقدم الخوارزمية المقترحة حلاً للحصول على أداء أفضل في شبكات SDN الهجينة الضوئية والتقليدية يؤمن زمن استجابة أقصر وزمن تأخير أقل. مما يرفع كفاءة عمل هذه الشبكات.
2. تُظهر تجارب إعادة إنشاء المسار أن الطريقة المقترحة تقلل زمن الاستجابة حين ضرورة إعادة إنشاء المسار وهذا يجعل الشبكات التي تستخدمها أكثر مرونة وتحملًا لحالات الفشل الممكن في الوصلات.

3. من المعروف أن عمليات إعادة التكوين المتكررة للمسار تؤدي إلى زيادة عدد الرزم التي يتم إهمالها وبالتالي زيادة عدد الرزم التي يتم إعادة إرسالها، وبالتالي فإن الإقلال من عمليات إعادة إنشاء المسارات يؤدي إلى تحسين أداء الشبكة.
4. تحافظ الخوارزمية المقترحة في حال النقل باستخدام SDN على العدد الإجمالي للتدفقات عند أدنى مستوى ممكن وبالتالي يجعل الخوارزمية سريعة ويقلل من الحمل.
5. تساعد هذه الخوارزمية في توفير وإدارة المسارات في الشبكات SDN المختلطة مع تباين سعة وصلاتها وكلفة المسارات فيها.

7. المراجع

1. THYAGATURU, A. S.; MERCIAN, A.; MCGARRY, M. P.; REISSLEIN, M.; KELLERER, W. *Software defined optical networks (SDONs): A comprehensive survey*. IEEE Communications Surveys Tutorials, 18(4), 2016,2738-2786.
2. BHAUMIK, P.; ZHANG, S.; CHOWDHURY, P.; LEE, S. S.; LEE, J. H.; MUKHERJEE, B. *Software-defined optical networks (SDONs): a survey*. Photonic Network Communications, 28(1),2014, 4-18.
3. JHA, R. K.; LLAH, B. N. M. *Software Defined Optical Networks (SDON): proposed architecture and comparative analysis*. Journal of the European Optical Society-Rapid Publications, 15(1),2019, 16.
4. ZHAO, Y.; WANG, Y.; WANG, W.; YU, X. *Software-Defined Optical Networking (SDON): Principles and Applications*. In Optical Fiber and Wireless Communications. InTech, (2017).
5. KARTALOPOULOS, S. V. *DWDM: networks, devices, and technology*. Wiley: IEEE Press,2003.
6. ITU, G. 694.1: *Spectral grids for WDM applications: DWDM frequency grid*. The International Telecommunication Union (ITU), 2012.
7. MURTHY, C. S. R.; GURUSAMY, M. *WDM optical networks: concepts, design, and algorithms*. Prentice Hall,2002.
8. *Optimal Design of a Multi-Layer Network an IP/MPLS Over DWDM Application Case* . [Online]. Available:<http://dx.doi.org/10.5772/54340>
9. CANALE, E.; RISSO, C.; ROBLEDO, F. *Optimal design of an IP/MPLS over DWDM network*. PesquisaOperacional, 34(1),2014, 3-30.
10. ALZHRANI, S. A.; KATIB, I. A. *Impact of varying IP/MPLS capacity module's size in three-layer networks*. In 2018 IEEE 8th Annual Computing and Communication Workshop and Conference (CCWC), IEEE, 2018, pp. 959-964.
11. *A Primer on ROADM Architecture, ADVA*. [Online]. Available: <https://oristel.com.sg/wp-content/uploads/2015/03/A-Primer-on-ROADM-Architectures.pdf>.

12. OKAMURA, H.; SEYMOUR, P. D. *Multicommodity flows in planar graphs*. Journal of Combinatorial Theory, Series B, 31(1),1981, 75-81.
13. SIQUEIRA, M.; OLIVEIRA, J.; CURIEL, G.; HIRATA, A.; VAN'T HOOFT, F.; NASCIMENTO, M.; ROTHENBERG, C. E. *An optical SDN controller for transport network virtualization and autonomic operation*. In 2013 IEEE Globecom Workshops (GC Wkshps), IEEE,2013,pp. 1198-1203.
14. KERIVIN, H.; MAHJOUB, A. R. *Design of survivable networks: A survey*. Networks: An International Journal, 46(1),2005, 1-21.
15. KUNDRÁT, J; HAVLIŠ, O; JEDLINSKÝ, J; VOJTĚCH, J. *Opening up ROADMs: let us build a disaggregated open optical line system*. Journal of Lightwave Technology, 37(16), 2019,4041-4051.
16. KOSTER, A. M.; ORLOWSKI, S.; RAACK, C.; BAIER, G.; ENGEL, T. *Single-layer cuts for multi-layer network design problems*. In Telecommunications Modeling, Policy, and Technology Springer, Boston, MA,2008,pp. 1-23.
17. ORLOWSKI, S.; KOSTER, A. M.; RAACK, C.; WESSÁLY, R. *Two-layer network design by branch-and-cut featuring MIP-based heuristics*. 2006.
18. TIPPER, D. *Resilient network design: challenges and future directions*. Telecommunication Systems, 56(1), 2014,5-16.
19. PARODI, C.; ROBLEDO, F.; ROMERO, P.; TESTURI, C. E. *Resilient Overlay Design in DWDM Systems*. Yugoslav Journal of Operations Research, 26(3),2016.
20. BISWAS, M. I.; MORROW, P.; ABU-TAIR, M.; MCCLEAN, S.; SCOTNEY, B.; PARR, G. *A SDN-based on-demand path provisioning approach across multi-domain optical networks*. In 2018 IEEE 20th International Conference on High Performance Computing and Communications.; IEEE 16th International Conference on Smart City.; IEEE 4th International Conference on Data Science and Systems (HPCC/SmartCity/DSS), IEEE ,2018,pp. 903-908.
21. ROŽIĆ, Ć.; SAVI, M.; MATRAKIDIS, C.; KLONIDIS, D.; SIRACUSA, D. A *Dynamic Multi-Layer Resource Allocation and Optimization Framework in Application-Centric Networks*. Journal of Lightwave Technology, 36(20),2018, 4908-4914.
22. KANTOR, M.; BIERNACKA, E.; BORYŁO, P.; DOMŻAŁ, J.; JURKIEWICZ, P.; STYPIŃSKI, M.; WÓJCIK, R. *A survey on multi-layer IP and optical Software-Defined Networks*. Computer Networks, 162,2019, 106844.
23. LOPEZ, V.; CONTRERAS, L. M.; DE DIOS, O. G.; PALACIOS, J. P. F. *Towards a transport SDN for carriers networks: An evolutionary perspective*. In 2016 21st European Conference on Networks and Optical Communications (NOC) ,IEEE,2016,pp. 52-57.
24. CASCONI, C.; SANVITO, D.; POLLINI, L.; CAPONE, A.; SANZO, B. *Fast failure detection and recovery in SDN with stateful data plane*. International Journal of Network Management, 27(2),2017, e1957.
25. "Mininet: An Instant Virtual Network on your Laptop (or other PC) Mininet." [Online]. Available: <http://mininet.org/>
26. ONOS. [Online] Available: <http://github.com/opennetworkinglab/onos>
27. LINC-OE: LINC-Switch for optical emulation, Available https://github.com/FlowForwarding/LINCswitch/blob/master/docs/optical_extension.md.