

دمج مستوى تحكم الشبكات الضوئية المبدلة آلياً (ASON\GMPLS) في الشبكات المعرفة بالبرمجيات (SDN\OpenFlow)

د. جمال خليفة *

د. اسماعيل جنود **

يحيى حسن ***

(تاريخ الإيداع 22 / 4 / 2020. قُبل للنشر في 20 / 9 / 2020)

□ ملخص □

أظهرت تقنية الشبكات الضوئية المعتمدة على Automatically Switched Optical Network (ASON\Generalized Multi-Protocol Label Switching (GMPLS) وثوقية عالية في الآونة الأخيرة، إلا أن مسألة التحكم الموحد في الشبكات الضوئية أمست ضرورة ملحة لتغطية المشاكل الناتجة عن التحكم المنفصل بين طبقات الشبكة الضوئية المختلفة. وقد حققت محاولة تطبيق التحكم الموحد المستند إلى GMPLS في شبكات بروتوكول الانترنت/التنضيد بتقسيم طول الموجة المكثف Internet Protocol /Dense Wavelength Division Multiplexing (IP/DWDM) نتائجاً مرضية لكنها عكست تعقيداً كبيراً عند التشغيل في الزمن الحقيقي. من ناحية أخرى، يتم طرح مستوى تحكم OpenFlow كحل واعد ليكون مستوى تحكم موحد في مثل هذه الشبكات، لكنه ليس فعالاً بدرجة كافية للتحكم في عقد التبديل الضوئية حتى الآن. لذلك، كخطوة وسيطة نحو مستوى تحكم موحد UCP يستند كلياً إلى البروتوكول OpenFlow، فإن الخيار المنطقي في الوقت الحالي هو تقديم مستوى تحكم التشغيل البيئي OpenFlow/GMPLS القادر على استخدام GMPLS للتحكم في الطبقة الضوئية والتنسيق الديناميكي بين طبقة IP والطبقات الضوئية. يُقدم هذا البحث تطبيقاً عملياً لحلول التشغيل البيئي (المتوازي والمتراكب والمتكامل) لمستويات التحكم GMPLS و OpenFlow المطبقة على الشبكة الضوئية ASON المركبة في المنطقة الجنوبية من سوريا. وقد أظهرت النتائج بأن الحل المتكامل للتحكم الموحد يتفوق على الحلول المتوازية والمتراكبة من حيث زمن التأخير الكلي لتوفير المسار في الشبكة الضوئية (OPPL) Overall path provisioning latency، على حساب التعقيد العالي للتصميم ومعالجة الحمل داخل المتحكم.

الكلمات المفتاحية: الشبكات الضوئية المبدلة آلياً ASON، تبديل اللافتات متعدد البروتوكولات المعمم GMPLS، الشبكات المعرفة بالبرمجيات SDN، البروتوكول OpenFlow، مستوى التحكم الموحد UCP.

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

Control Plane Integration of Automatically Switched Optical Network(ASON)\Generalized Multi-Protocol Label Switching (GMPLS) Networks into Software Defined Networking(SDN)\OpenFlow Networks

Dr. Jamal Khalifa *
Dr. Ismaeel Janoud **
Yahya Hasan***

(Received 22 / 4 / 2020. Accepted 20 / 9 / 2020)

□ ABSTRACT □

ASON\GMPLS based optical network technology has shown high reliability recently, but the issue of unified control of optical networks has become an urgent necessity to cover problems caused by separate control between different optical network layers. The attempt to implement GMPLS-based standardized control of Internet Protocol / Dense Wavelength Division Multiplexing (IP/DWDM) networks has yielded satisfactory results but reflected significant complexity when operating in real time. On the other hand, the OpenFlow control level is offered as a promising solution to be a uniform control level for such networks, but it is not yet effective enough to control optical switch nodes. Therefore, as an intermediate step towards a unified UCP level entirely based on the OpenFlow protocol, the logical thinking for the time being is to introduce an OpenFlow/GMPLS interoperability control level that uses GMPLS to control the optical layer and the dynamic coordination between the IP layer and the optical layers. This research presents a practical application of interoperability solutions (parallel, overlapping, and integrated) for GMPLS and OpenFlow control levels applied to the ASON optical network installed in the southern region of Syria. The results have shown that the integrated solution for uniform control is superior to parallel and overlapping solutions in terms of the overall path provision latency (OPPL), at the expense of the high complexity of the design and processing of the load within the controller.

Keywords: Automatically Switched Optical Network (ASON), Generalized Multi-Protocol Label Switching (GMPLS), Software-Defined Networking (SDN), OpenFlow Protocol, unified control plane (UCP).

* Professor- Department of Communication and Electronics- Faculty of Mechanical and Electrical Engineering- Tishreen University- Lattakia- Syria.

** Associate Professor- Department of Communication and Electronics- Faculty of Mechanical and Electrical Engineering- Damascus University- Damascus- Syria.

*** Postgraduate Student (PhD) - Department of Communication and Electronics- Faculty of Mechanical and Electrical Engineering- Tishreen University- Lattakia- Syria.

مقدمة:

في الشبكات الضوئية ASON/GMPLS، يتم التحكم في العقد الضوئية من خلال نظام إدارة العنصر element management system (EMS) ونظام إدارة الشبكة network management system (NMS) بأسلوب يدوي وشبه ثابت لتوفير المسار الضوئي light path، من طرف إلى طرف. على الرغم من أن هذا النهج موثوق للغاية، إلا أن شركات الاتصالات تتطلب تقنية مستوى تحكم موحدة للتحكم في طبقة IP والطبقات الضوئية في نفس الوقت، لتوفير النفقات التشغيلية وتقليل زمن تأخير المعالجة والتعامل مع الزيادة السريعة في حركية المعطيات. أحد الخيارات الرئيسية للتحكم الموحد، هو تبديل اللافتات متعددة البروتوكولات GMPLS، والتي تمثل مجموعة بروتوكولات مستقرة لتوفير إتصالات من طرف إلى طرف بشكل آلي وبطريقة موزعة بالكامل. لكن على الرغم من ذلك، لم يتم نشر مستوى التحكم المستند إلى GMPLS كمستوى تحكم موحد في الشبكة الضوئية العمود فقري (backbone) على نطاق واسع، لعدة أسباب، أهمها، أن مستوى التحكم القائم على GMPLS معقد جداً، خاصة عندما يتم استخدامه كمستوى تحكم موحد UCP في الشبكات الضوئية متعددة الطبقات [1-2]، وسبب هذا التعقيد هو طبيعة GMPLS الموزعة وعدد البروتوكولات المستخدمة، إضافة إلى التفاعلات بين الطبقات المختلفة. والسبب الآخر هو أن مرونة وإمكانية التحكم في مستوى التحكم القائم على GMPLS منخفضة، لأنه على سبيل المثال، إذا كانت شركة نقل الاتصالات الضوئية تريد تحديث السياسة التشغيلية أو خوارزمية حساب المسار، يجب تعديل وتحديث جميع المتحكمات (GCs) GMPLS controllers.

في السنوات الأخيرة، تم اقتراح بنية الشبكات المعرفة بالبرمجيات SDN، التي تستند إلى بنية البروتوكول OpenFlow. على الرغم من أن الدافع الرئيسي الذي كان وراء البروتوكول OpenFlow هو تطوير شبكات افتراضية وقابلة للبرمجة، فقد تم اعتباره أيضاً مرشحاً واعداً لتقنية مستوى التحكم الموحد في الشبكات غير المتجانسة [3]. يمكن أن يوفر OpenFlow المرونة المرضية للمشغلين من أجل التحكم في الشبكات المعرفة بالبرمجيات، ويمكن أن يحظى بتفضيلات شركات الاتصالات نظراً لبساطته وقابلية إدارته. نظراً لمزايا OpenFlow، فضلاً عن قدرته المحتملة على أداء وظيفة التحكم الموحدة في ربط الشبكات، خاصة بالنسبة للشبكات الضوئية متعددة الطبقات، حظي باهتمام كبير من كل من الأوساط الأكاديمية والصناعية في جميع أنحاء العالم [4]. ولكن، على الرغم من أن مستوى التحكم المستند إلى OpenFlow يحقق فوائد كثيرة، إلا أنه لا يزال غير قادر على التحكم الكامل بالشبكة الضوئية مقارنة بـ GMPLS، كما أنه يحتاج بنية تحتية جديدة تتطلب نفقات كبيرة غير مبررة. لذلك، وكخطوة وسيطة نحو مستوى تحكم موحد UCP يستند إلى البروتوكول OpenFlow بالكامل، فإن الخيار المنطقي في الوقت الحالي هو تقديم مستوى تحكم للتشغيل البيئي OpenFlow/GMPLS يكون قادراً على استخدام GMPLS للتحكم في الطبقة الضوئية والتنسيق الديناميكي بين طبقة IP والطبقات الضوئية. سيتم في هذا البحث دراسة واختبار حلول التشغيل البيئي بين مستويات التحكم OpenFlow و GMPLS (الحل الموازي، الحل المتراكب والحل المتكامل) من أجل التحكم الذكي في المسار الضوئي في طبولوجيا الشبكة الضوئية الموجودة في المنطقة الجنوبية من سوريا، وسنختبر هذه الحلول الثلاثة في بيئة افتراضية ومقارنتها وتقييم أدائها كميًا، اعتماداً على المحاكى Mininet والمتحكم NOx.

دراسة مرجعية

تم نشر العديد من الأوراق البحثية حول موضوع الشبكات المعرفة بالبرمجيات SDN، تعرض معظمها نظرة عامة واسعة عن تقنيات SDN في شبكات متعددة، من مراكز البيانات إلى الشبكات اللاسلكية والشبكات الضوئية [5]. عملياً،

بدأت الدراسات الاستقصائية بشأن حلول شبكات النقل الضوئية المعرفة بالبرمجيات SDN بالمرحلة الأولى من مسارها التطوري، حيث كان التركيز على تطبيق مفاهيم الشبكات المعرفة بالبرمجيات SDN في الشبكات الضوئية وحيدة المجال من أجل تحكم موحد بالطبقة الضوئية وطبقة IP [6,7]، سميت هذه الخطوة التطورية الضرورية بالشبكات الضوئية المعرفة بالبرمجيات (SDON). ركزت الدراسات [8,9] على أنشطة البحوث المتعلقة بالشبكات المعرفة بالبرمجيات من أجل النفاذ الضوئي وشبكات المترو والشبكة المركزية. قدمت [10] نظرة عامة على الجهود البحثية المتعلقة بالتشغيل البيئي بين GMPLS و OpenFlow للتحكم في الشبكات المرنة (flexi-grid networks). لكن جميع هذه الدراسات أعطت نتائج نظرية، ولم تأخذ بالحسبان إمكانية التحكم في شبكة ضوئية قائمة. ومن المعروف بأن البنية التحتية للشبكات الضوئية مكلفة جداً ومن غير المعقول تغييرها بشكل كامل دفعة واحدة. لذلك قمنا في هذه الدراسة باقتراح بعض الحلول لربط الشبكة الضوئية القائمة ASON\GMPLS في المنطقة الجنوبية من سوريا مع شبكة SDN. ريثما يتم تطوير الشبكة والوصول إلى مستوى تحكم ثابت ومستقر يستند إلى SDN\OpenFlow يمكنه التحكم بالشبكة الضوئية بشكل كامل.

أهمية البحث وأهدافه:

أهمية البحث

تتطلب أهمية البحث من ضرورة إيجاد مستوى تحكم موحد للطبقات الضوئية وطبقة IP بهدف دمج الشبكات الضوئية الحالية ASON\GMPLS ضمن نموذج الشبكات المعرفة بالبرمجيات SDN. لأن تغيير البنية التحتية للشبكة الضوئية له كلفة باهظة، إضافة إلى عدم قدرة البروتوكول OpenFlow، حتى الآن، على التحكم الكامل بالمجال الضوئي. لقد فشلت GMPLS من حيث التطبيق الفعلي كمستوى تحكم موحد في الشبكات الواسعة، على الرغم من أنها خضعت لعملية معيّنة طويلة في ITU، IETF، OIF؛ ولكن وبعد مرور عقد من الزمن، لم يكن هناك حتى نشر تجاري واحد لـ GMPLS كمستوى تحكم موحد UCP. عند ظهور بنية الشبكات المعرفة بالبرمجيات، تم اعتبار البروتوكول OpenFlow مرشحاً واعداً لتقنية مستوى التحكم الموحد في الشبكات غير المتجانسة. على الرغم من أن مستوى التحكم المستند إلى OpenFlow يحقق فوائد كثيرة، إلا أنه لا يزال غير ناضج للتحكم في الشبكة الضوئية مقارنة بـ GMPLS. لذلك كان لا بد من إيجاد طرق آنية للتعامل بين الشبكات الضوئية الحالية ASON التي تستند على مستوى تحكم GMPLS وتقنية الشبكات الحديثة SDN\OpenFlow، ريثما يتم التوصل إلى مستوى تحكم موحد ومستقر يعتمد على البروتوكول OpenFlow.

أهداف البحث

يهدف هذا البحث إلى دراسة شبكات ASON\GMPLS، المنفذة حالياً على أرض الواقع في سوريا (المنطقة الجنوبية)، ومقارنتها مع نماذج الشبكات الحديثة SDN\OpenFlow. ودراسة إمكانية دمج هذه الشبكات في النموذج الجديد من خلال وضع الحلول المناسبة لتكامل مستوى التحكم GMPLS مع نموذج الشبكات SDN\OpenFlow.

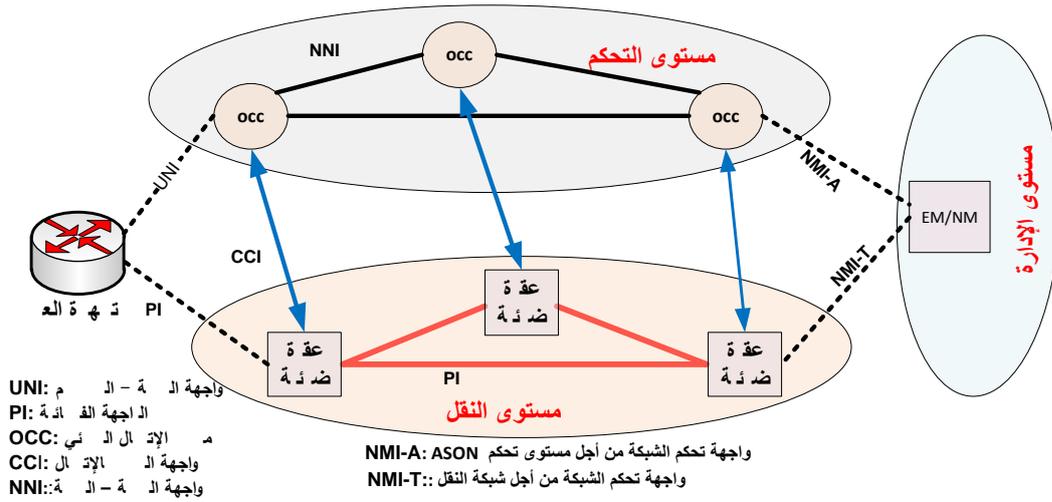
طرائق البحث ومواده:

1- دراسة مبدأ عمل الشبكات الضوئية المبدلة ألياً (ASON)، والإضاءة على مجموعة بروتوكولات GMPLS.

- 2- دراسة نموذج الشبكات المعرفة بالبرمجيات SDN، والإضاءة على البروتوكول OpenFlow.
- 3- دراسة إمكانية تكامل مستوى التحكم الضوئي مع مستوى IP ووضع حلول للتشغيل البيئي بين مستويات التحكم GMPLS\OpenFlow.
- 4- دراسة البيئة الافتراضية التي سيتم تنفيذ الحلول المقترحة عليها، ومقارنة الحلول التي تم وضعها، ومقارنتها وتقييم أدائها كمياً وتحليل المخططات الناتجة عن ذلك.
- 5- وضع التوصيات بشأن الحلول المقترحة استناداً إلى النتائج التي تم الحصول عليها.

1. الشبكات الضوئية المبدلة آلياً Automatically Switched Optical Network

من أجل التغلب على مشاكل الشبكات الضوئية التقليدية [11]، تعتمد الشبكات الضوئية المبدلة آلياً ASON على إضافة مستوى تشغيل ثالث يسمى مستوى التحكم، يقوم بوظائف التحكم في الاتصال وتأمين الاتصال في الوقت الحقيقي. يساعد مستوى التحكم على نقل بعض نكء الشبكة إلى عناصر الشبكة (Network Node)، بهدف توفير وظائف التحكم الآلي لموارد الشبكة والإرتباطات. تتراوح تقنيات التبديل المستخدمة في ASON من التبديل البسيط للألياف إلى الطول الموجي إلى التبديل بين الحزم الضوئية. تتألف بنية ASON من ثلاث مستويات وهي مستوى النقل، مستوى التحكم و مستوى الإدارة كما هو مبين في الشكل (1).



الشكل (1) البنية المنطقية لشبكة ASON

1.1 وظائف مستوى تحكم ASON:

إن مستوى التحكم هو عبارة عن مجموعة من المكونات المرتبطة مع بعضها لتقوم بإعداد الإرتباطات من طرف إلى طرفٍ وتحريرها وصيانتها، يستطيع مستوى التحكم من خلال الواجهات والبروتوكولات وأنظمة التشوير تبادل معلومات الطوبولوجيا ديناميكياً، ومعلومات التوجيه وإشارات التحكم الأخرى للشبكة الضوئية، أو إعداد الأقفنية الضوئية بشكل ديناميكي أو هدمها، وتنفيذ التخصيص الديناميكي لموارد الشبكة واستعادة الإرتصال عندما يحدث خطأ ما. يمكن تقسيم هذه الوظائف إلى [12]:

- (1) الإكتشاف Discovery: يمكن تمييز ثلاث مجموعاتٍ من وظائف الإكتشاف وهي إكتشاف الجوار وإكتشاف الموارد وإكتشاف الخدمة المسؤولة عن التحقق من إمكانات الخدمة الخاصة بالشبكة وتبادلها.

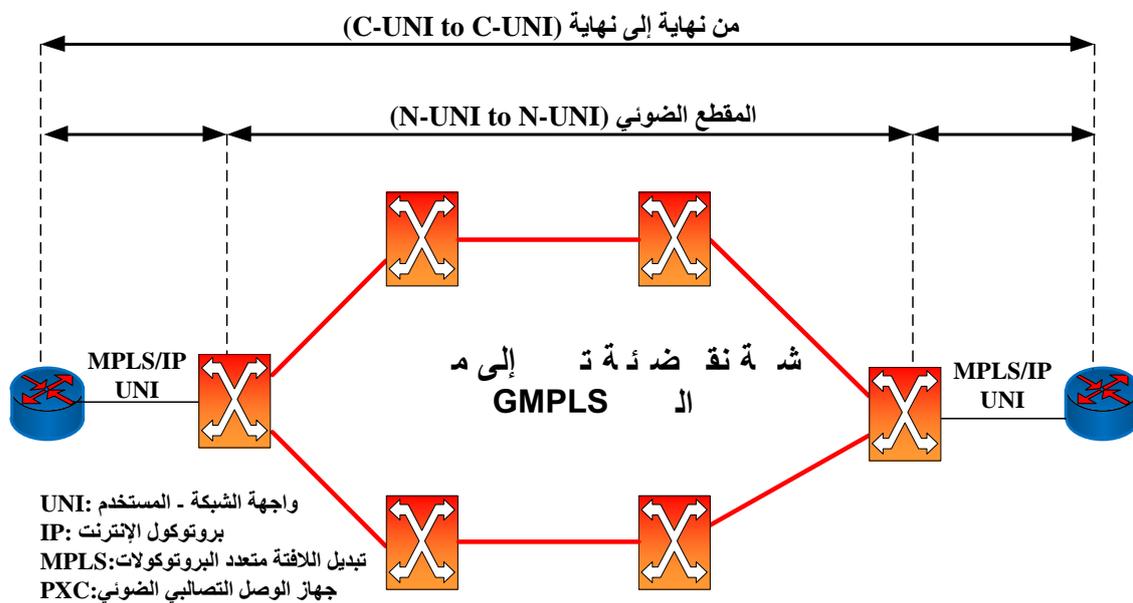
(2) **التوجيه Routing**: يستخدم لتحديد المسارات من أجل إنشاء الارتباطات عبر الشبكة، حسب التوصية ITU-T .G.7715/Y.1706

(3) **التشوير Signaling**: يشمل التشوير نقل رسائل التحكم بين جميع المكونات التي ترتبط مع بعضها عبر مستوى التحكم في الشبكة. حسب التوصيات .G.7713.1/Y.1704.1، .G.7713.2/Y.1704.2

(4) **الحماية والإستعادة: Protection and Restoration**: يتم تحقيق وثوقية أعلى لشبكة ASON باستخدام أنماط مرونة مختلفة، يتم دعم هذه المرونة من خلال آليات الحماية أو الاستعادة.

2. البروتوكول Generalized Multi-Protocol Label Switching(GMPLS)

تهدف مجموعة بروتوكولات GMPLS إلى تعميم تطبيق بروتوكولات MPLS على الشبكات الضوئية بالكامل، من خلال تعميم فكرة اللافتة لتعريف تدفق حركية المرور. حيث يمكن تخصيص طول موجة واحدة بالكامل للتدفق المطلوب. يوضح الشكل (2) البنية العامة والواجهات الرئيسية للشبكة الضوئية التي تعتمد على GMPLS [13].



الشكل (2) البنية العامة لشبكة ضوئية تستند إلى GMPLS

2.1. الواجهات التي تدعمها GMPLS

تدعم GMPLS عدداً من الواجهات الرئيسية والتي تكون ذات بنية هرمية يتم التحكم فيها في وقت واحد وهي:

(1) **Packet Switching Capable (PSC)**: تتعرف هذه الواجهات على حدود الحزم، ويمكنها توجيه الحزم استناداً إلى ترويسة IP أو ترويسة MPLS القياسية.

(2) **Layer 2 Switch-Capable (L2SC)**: تتعرف هذه الواجهات على ترويسات الإطارات والخلايا، ويمكنها توجيه البيانات استناداً إلى محتوى ترويسة الإطار أو الخلية.

(3) **Lambda Switch-Capable (LSC)**: هذه الواجهات مخصصة لتحكم MPLS الذي يستند على الطول الموجي بالأجهزة الضوئية وأجهزة تبديل الطول الموجي. تقوم هذه الواجهات بتوجيه الإشارة الضوئية من طول موجة ضوئية واردة إلى طول موجة ضوئية صادرة، حيث يتم توجيه حركية المرور بناءً على الطول الموجي.

(4) **Fiber-Switch-Capable (FSC)**: تقوم هذه الواجهات بتوجيه الإشارة من ليف أو عدة ألياف واردة إلى ليف أو عدة ألياف صادرة للتحكم المكاني في اختيار الواجهة، وأنظمة تبديل الألياف الفيزيائية. حيث يتم توجيه حركية المرور استناداً إلى المنفذ أو الليف أو الواجهة.

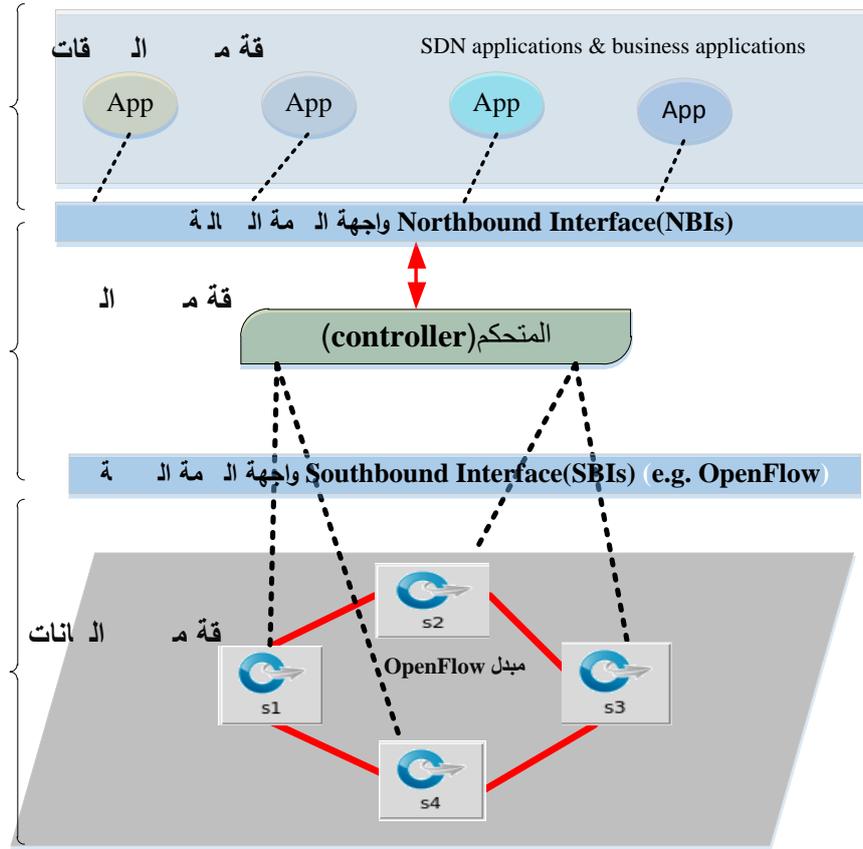
تكون اللافتات في MPLS مضمنة في بنية الخلية أو الحزمة من أجل تشوير مستوى التحكم داخل النطاق (in-band)، ولكن مع الأنواع المختلفة من الواجهات التي يدعمها GMPLS، يتعذر تضمين المعلومات الخاصة باللافتات، من حيث تبديل منفذ الألياف أو تبديل الطول الموجي، في بنية حزمة حركية المرور. لذا، تمت إضافة لافتات "افتراضية" جديدة إلى بنية لافتة MPLS، تحتوي على مؤشرات محددة تمثل: wavelengths، fiber ports، fiber bundles، ويتم توزيعها على عقد GMPLS من خلال تشوير GMPLS خارج النطاق (out-band) [14].

3. نشأة الشبكات المعرفة بالبرمجيات Software Defined Networking وخصائصها:

تفصل تقنية الشبكات المعرفة بالبرمجيات SDN بين وظائف البيانات والتحكم الخاصة بأجهزة الشبكات، مثل أجهزة التوجيه ومبدلات الحزم ومبدلات الشبكة المحلية LAN، وتستخدم واجهة برمجة تطبيقات (API) بين الاثنين، المثال الأبرز لهذه الواجهة API هو البروتوكول OpenFlow. تُسهل SDN المحاكاة الافتراضية لوظائف الشبكة، بحيث يمكن لعدة شبكات افتراضية أن تعمل على البنية التحتية لشبكة مادية معينة. لقد أتاح نشوء الشبكات المعرفة بالبرمجيات وتمكين البروتوكول OpenFlow نموذجاً محتملاً لتطبيق مستوى تحكم مرن وقابل للبرمجة على البنية التحتية للشبكة الفيزيائية المشتركة. كما أن تطبيق نموذج SDN على الشبكات الضوئية يُشكل الشبكات الضوئية المعرفة بالبرمجيات Software Defined Optical Networking (SDON)، التي تجمع بين فوائد تحكم SDN وسعة النقل الضوئية العالية، حيث تسعى SDONs إلى الاستفادة من مرونة التحكم الموجودة في SDN لدعم تطبيقات الشبكات في البنية التحتية للشبكة الضوئية [15].

3.1. بنية Software Defined Networking (SDN)

يوضح الشكل (3) البنية المنطقية لـ SDN، يقوم المتحكم المركزي بتنفيذ جميع الوظائف المعقدة، بما في ذلك التوجيه وإعلان السياسة واختبارات الأمان، وهذا ما يشكل مستوى تحكم SDN، الذي يتكون من واحد أو أكثر من مخدمات SDN. يحدد متحكم SDN تدفقات البيانات التي ستعبر في مستوى بيانات SDN، كل تدفق سيعبر من خلال الشبكة يجب أن يحصل أولاً على إذن من المتحكم، والذي يؤكد من أن الإتصال مسموح به وفقاً لسياسة الشبكة. في حال سمح المتحكم للتدفق بالمرور، فعليه أن يحسب مساراً للتدفق المطلوب، ويضيف إدخالاً لهذا التدفق في كل مبدل من المبدلات على طول المسار [16].



الشكل (3) البنية المنطقية لـ SDN

تتألف شبكة SDN من ثلاث طبقات وهي بالترتيب من الأسفل إلى الأعلى: طبقة مستوى البيانات (البنية التحتية)، طبقة التحكم وطبقة التطبيقات.

(1) طبقة مستوى البيانات:

تشمل طبقة مستوى البيانات على بيئة (الحمولة) من أجل توجيه حركية المعطيات (طبقة البيانات) سواء في الأجهزة الافتراضية أو الفعلية. يتألف مستوى البيانات من شبكة من عناصر الشبكة، والتي تقدم إمكانياتها عبر واجهة التطبيقات الجنوبية إلى مستوى التحكم.

(2) طبقة التحكم:

إن طبقة التحكم هي المسؤولة عن برمجة (إعداد) عناصر الشبكة من خلال واجهة SBI. أما متحكم SDN فهو كيان منطقي يقوم بتعريف تعليمات واجهة SBI لتكوين بنية الشبكة الأساسية اعتماداً على متطلبات طبقة التطبيقات. من أجل إدارة الشبكة بكفاءة، يمكن للمتحكمات في SDN أن تطلب معلومات من البنية التحتية SDN، مثل إحصائيات التدفق، معلومات الطوبولوجيا، علاقات الجوار وحالة الإرتباط من عناصر الشبكة (العقد).

(3) طبقة التطبيقات:

تشمل على تطبيقات الشبكة والخدمات التي تستخدم طبقة التحكم لتحقيق وظائف الشبكة على البنية التحتية الفيزيائية أو الافتراضية. تتضمن تطبيقات الشبكة إكتشاف طوبولوجيا الشبكة والتشغيل واستعادة العطل. كما أن متحكم SDN يقدم عرضاً تجريدياً عن الشبكة لتطبيقات SDN لتسهيل تحقيق وظائف التطبيق.

3.2 واجهات SDN الرئيسية:

- (1) Southbound Interface(SBIs): الواجهة المنطقية التي تربط بين متحكم SDN وعنصر الشبكة الذي يعمل على طبقة البنية التحتية (مستوى البيانات)، لذا فهي الأداة الحاسمة التي تفصل بشكل واضح بين وظائف مستوى التحكم ووظائف مستوى البيانات.
- (2) Westbound Interface (WBIs): تستخدم من أجل ربط مجال SDN مع مجالات SDN الأخرى.
- (3) Northbound Interface(NBIs): الواجهة المنطقية التي تربط بين متحكم SDN وكيان العتاد البرمجي.
- (4) Eastbound Interface(EBIs): تستخدم من أجل ربط مجال SDN مع مجالات الشبكات الأخرى (غير SDN).

3.3 الوظائف البنيوية لشبكة SDN:

- (5) فصل مستوى التحكم عن مستوى البيانات، أي تتم إزالة وظيفة التحكم من أجهزة الشبكة التي ستتحول إلى عناصر توجيه بسيطة.
- (6) تعتمد قرارات التوجيه على التدفق بدلاً من اعتمادها على الوجهة. يتم تعريف التدفق على نطاق واسع من خلال مجموعة من قيم حقل الحزمة التي تعمل كمعيار تطابق (مرشح) ومجموعة من الإجراءات (الإرشادات).
- (7) يتم نقل منطق التحكم إلى كيان خارجي، يسمى متحكم SDN أو نظام تشغيل الشبكة Network Operating System(NOS). حيث يوفر NOS الموارد الأساسية والتجريدات لتسهيل برمجة أجهزة التوجيه إستناداً إلى رؤية شبكة مجردة منطقية ومركزية. لذلك فإن هدفها مشابه لهدف نظام تشغيل الحاسب التقليدي.
- (8) الشبكة قابلة للبرمجة من خلال تطبيقات برمجية تعمل على قمة نظام تشغيل الشبكة التي تتفاعل معها أجهزة مستوى البيانات الأساسية.

4. البروتوكول OpenFlow

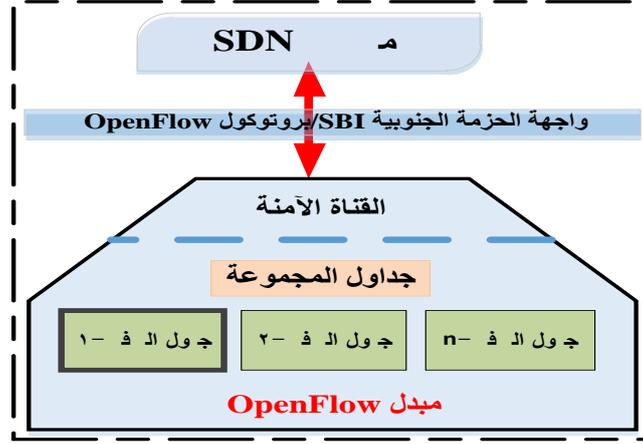
يُعتبر البروتوكول OpenFlow أول واجهة اتصالات قياسية بين مستوى التحكم ومستوى البيانات في بنية SDN. يتيح OpenFlow الوصول المباشر والتعامل مع مستوى توجيه أجهزة الشبكة مثل المبدلات والموجهات، سواءً الفعلية منها أو الافتراضية، وهو مصمم لإدارة حركية المرور وتوجيهها بشكل فعال عن طريق فك الارتباط بين طبقة التحكم وطبقة التوجيه. هناك حاجة إلى بروتوكول مثل OpenFlow لنقل التحكم في الشبكة من مبدلات الشبكة المسجلة الملكية إلى برنامج تحكم مفتوح المصدر يمكن إدارته محلياً. لذلك فإن الكثير من مزودي شبكات الإتصال للمبدلات والموجهات بدؤوا بدعم OpenFlow في تجهيزاتهم[17].

4.1 بنية OpenFlow

تتكون بنية OpenFlow العامة من ثلاثة مكونات رئيسية هي مبدل متوافق مع OpenFlow يحتوي على جدول التدفق والمنحكم والقناة الآمنة[16]، كما هو مبين في الشكل (4).

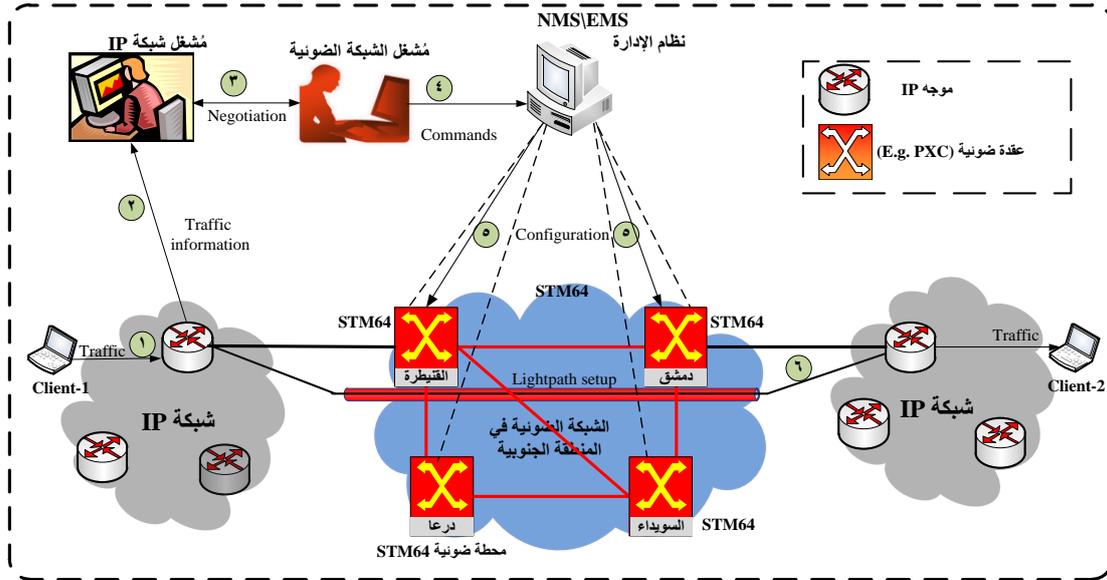
- (1) **جدول التدفق:** هو قائمة إدخلات التدفق، يحتوي كل إدخل على حقول تطابق وعدادات وإرشادات. تتم مقارنة الحزم الواردة مع حقول المطابقة لكل إدخل، وفي حالة وجود تطابق، تتم معالجة الحزمة وفقاً للإجراء المتضمن في هذا الإدخل. بينما يتم إستخدام العدادات للحفاظ على إحصائيات حول الحزم. يمكن أيضاً تغليف الحزمة وإرسالها إلى المتحكم.
- (2) **المتحكم:** هو الجزء الرئيس في شبكة SDN. عملياً هو مخدم يسمح للمطورين بتطوير وكتابة الخوارزميات والطوبولوجيا الخاصة بهم. أي يبرمجون كيف ستفاعل الشبكة مع الأحداث المختلفة باستخدام البروتوكول OpenFlow.

(3) **القناة الآمنة:** هي القناة التي تربط المتحكم مع جميع المبدلات. من خلال هذه القناة، يدير المتحكم المبدلات، يستقبل الحزم من المبدلات ويرسل الحزم إلى المبدلات. يجب أن يكون المبدل المتوافق مع OpenFlow قادر على توجيه الحزم وفقاً للقواعد المحددة في جدول التدفق.



الشكل (4) مكونات OpenFlow

5. **مكونات الشبكات الضوئية الحالية ASON\GMPLS وطريقة التحكم بها**
- تتكون الشبكات الضوئية الحالية ASON\GMPLS من مجموعة من العقد الضوئية ذات السعات المختلفة (STM64=10G, STM16=2.5G, STM4=622M, STM1=155M)، والتي يمكن أن نقسمها إلى:
- المنضدات الضوئية القابلة لإعادة التكوين (ROADM).
 - أجهزة الوصل التصالبي لطول الموجة (WXC) wavelength cross connects.
 - أجهزة الوصل التصالبي الضوئية (PXC) photonic cross-connects.
- يتم التحكم في هذه العقد الضوئية وإدارتها من خلال نظام إدارة العنصر (EMS) ونظام إدارة الشبكة (NMS) بأسلوب يدوي وشبه ثابت لتوفير المسار الضوئي، كما هو مبين في الشكل (5). لذا من أجل إعداد المسار بشكل كامل لا بد من التواصل بين مشغل شبكة IP من جهة وبين مشغل الشبكة الضوئية من جهة أخرى. على الرغم من أن هذا النهج موثوق للغاية، إلا أن شركات الاتصالات تتطلب تقنية مستوى تحكم موحدة من أجل:
- التحكم الديناميكي والذكي لمسارات الطول الموجي في الشبكات الضوئية من أجل توفير النفقات.
 - تقليل زمن تأخير معالجة.
 - التعامل مع الزيادة السريعة في حركية معطيات الشبكة الديناميكية.



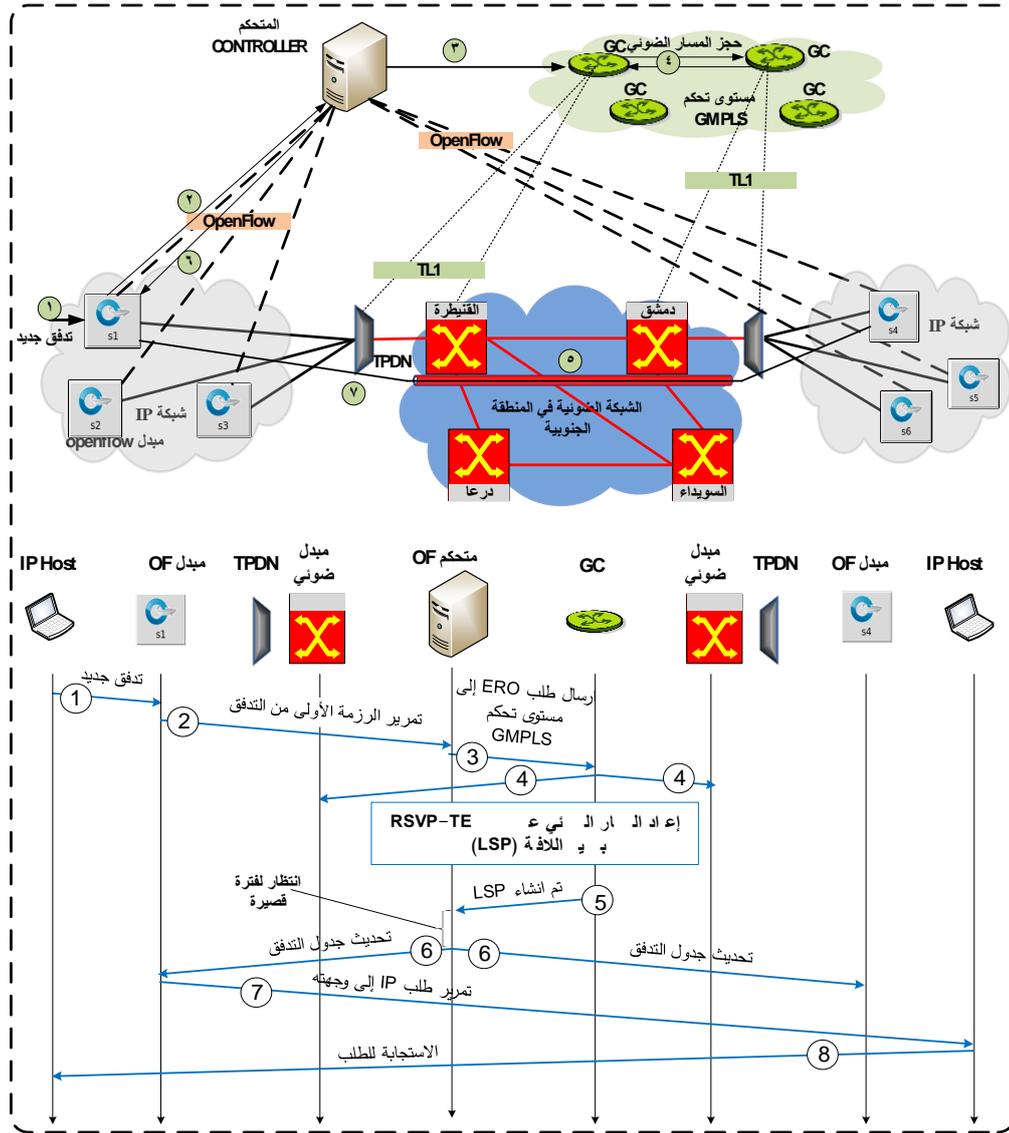
الشكل (5) توفير المسار الضوئي المستند إلى NMS/EMS في الشبكات الضوئية الحالية.

6. الحل المقترحة لتكامل مستوى تحكم SDN/OpenFlow و ASON/GMPLS

على الرغم من أن مستوى التحكم المستند إلى OpenFlow يحقق فوائد كثيرة، إلا أنه لا يزال غير ناضج للتحكم في الشبكة الضوئية مقارنة بـ GMPLS. لذلك، كخطوة وسيطة نحو مستوى تحكم موحد UCP يستند إلى بروتوكول OpenFlow بالكامل، فإن الخيار المنطقي في الوقت الحالي هو تقديم مستوى تحكم التشغيل البيئي OpenFlow/GMPLS القادر على استخدام GMPLS للتحكم في الطبقة الضوئية والتنسيق الديناميكي بين IP والطبقات الضوئية [18]. سنعرض في هذا السياق ثلاثة حلول لتكامل بين مستوى تحكم GMPLS و OpenFlow.

6.1 الحل الموازي Parallel Solution:

يسمى بالحل الموازي لأن مستويات التحكم في OpenFlow و GMPLS تكون مفصولة تمامًا عن بعضها من أجل التحكم في طبقة IP والطبقات الضوئية (على سبيل المثال، عقد التبديل الضوئي والمستجيبيات TPNDs)، على التوالي، حيث أن TPND هو مستجيب WDM/DWDM، ويسمى أيضًا مستجيب الألياف الضوئية، يستقبل الإشارة الضوئية ويضخمها ثم يعيد إرسالها بطول موجة مختلف دون تغيير محتوى الإشارة. تعتمد الواجهة بين متحكم OpenFlow (على سبيل المثال، المتحكم N0X) [19] ومستوى التحكم في GMPLS على تطبيقات خاصة بمورد التجهيزات. يوضح الشكل (6) الحل الموازي لربط مستويات التحكم OpenFlow/GMPLS وإجراءات توفير المسار من طرف إلى طرف. إذا وصل تدفق جديد إلى مدخل S1، وإذا كان هذا التدفق لا يتطابق مع أي إدخال تدفق موجود، سيتم توجيه الحزمة الأولى من هذا التدفق إلى المتحكم من أجل المعالجة. وفقًا لعناوين المصدر والوجهة، يطلب المتحكم من مستوى تحكم GMPLS إعداد مسار تبديل اللاقطة (LSP) في المجال الضوئي من خلال بروتوكول حجز الموارد مع هندسة الحركية Traffic Engineering (RSVP-TE) Resource Reservation Protocol.



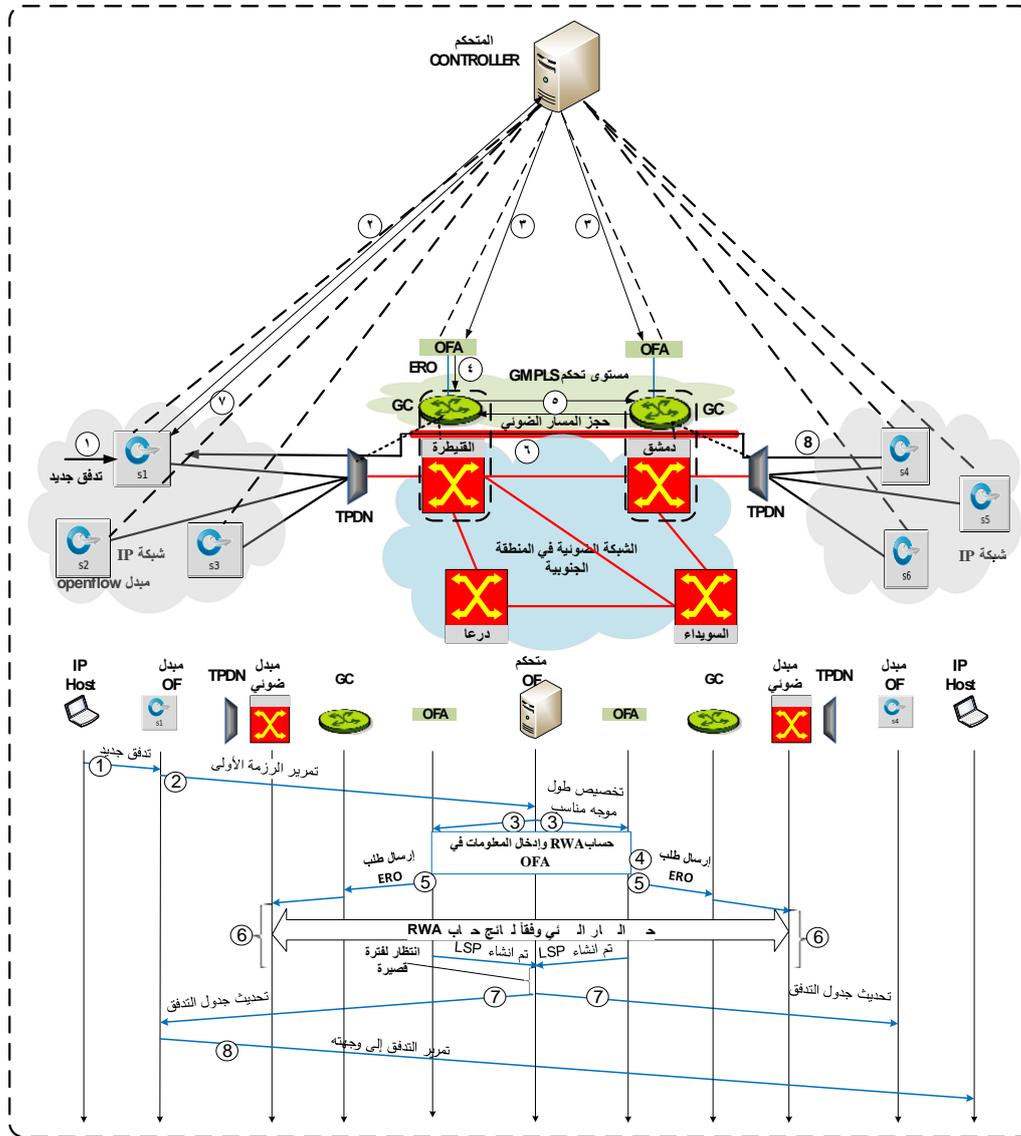
الشكل (6) الحل الموازي لربط مستوى تحكم GMPLS مع مستوى تحكم OpenFlow

يمكن للمتحكم إجراء عملية تخصيص طول الموجه والتوجيه Routing and Wavelength Assignment (RWA)[20] نظرًا لمعلومات الشبكة الكاملة المتوفرة لديه. ومن جهة أخرى، فإن مستوى تحكم GMPLS قادر على إجراء حساب RWA. في كلتا الحالتين، ومن أجل ضمان وجود مسار التبديل باللائحة LSP الذي تم إنشاؤه بالكامل قبل وصول التدفق إلى العقدة الضوئية للدخول (ingress optical node)، يتعين على المتحكم انتظار فترة زمنية محددة ومدروسة، مع الأخذ بالحسبان زمن تأخير تشوير RSVP-TE وزمن التأخير لتكوين العقد الضوئية والمستجيبات TPNDs، بعد ذلك يتم إدراج إدخال تدفق جديد في مبدل الدخول S1 لبدء إرسال التدفق. يُعد الحل الموازي هو الطريقة الأكثر وضوحاً لتشغيل مستويي التحكم OpenFlow/GMPLS مع بعض. ولكن، في هذه الحالة، لا تعتمد الواجهة بين المتحكم ومستوى تحكم GMPLS على بروتوكول قياسي، لذلك يمكن أن تسبب هذه الواجهة غير القياسية مشاكل خطيرة في التشغيل المتداخل متعدد الموردين، لأن الموردين يمكن أن يستخدموا واجهات

مختلفة لتلبية متطلباتهم الخاصة. علاوة على ذلك، يجب إدخال رسائل وبروتوكولات جديدة إلى المتحكم، مما يزيد من تعقيد التصميم. لمعالجة هذه المشاكل، تم إقتراح الحل المتراكب.

6.2. الحل المتراكب Overlay Solution:

يوضح الشكل (7) الحل المتراكب لربط مستويات التحكم OpenFlow/GMPLS وإجراءات توفير المسار من طرف إلى طرف.



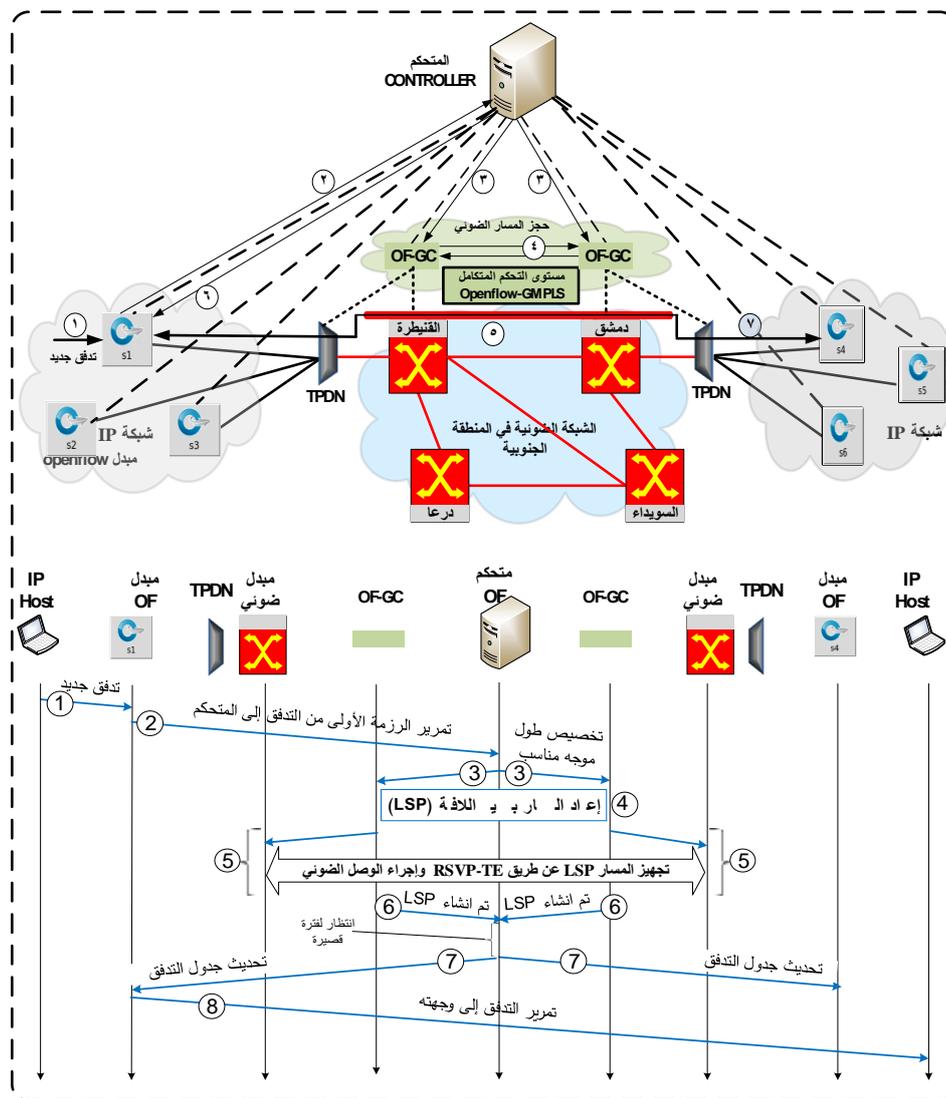
الشكل (7) الحل المتراكب لربط مستوى تحكم GMPLS مع مستوى تحكم OpenFlow

باستخدام هذا الحل، يتم إدخال وحدة OpenFlow Agent (OFA) بين المتحكم وكل متحكم من متحكمات GMPLS (GC). بإدخال OFA، يصبح المتحكم قادراً على التحكم في كل من طبقة IP والطبقة الضوئية من خلال البروتوكول OpenFlow، وهو مفيد في معالجة مشاكل قابلية التشغيل البيئي متعددة الموردين وتبسيط تصميم المتحكم. يسمى هذا الحل بالحل المتراكب لأن مستوى التحكم المستند إلى OpenFlow موجود في طبقة أعلى من مستوى تحكم GMPLS. حالما يستلم المتحكم الحزمة الأولى من التدفق الجديد، يقوم بتنفيذ حساب RWA ثم يدرج

إدخال تدفق جديد في كل OFA على طول المسار المحسوب في المجال الضوئي باستخدام رسائل Flow Mod [21]، ابتداء من OFA الدخول. في هذه الحالة، يجب استخدام ملحقات البروتوكول OpenFlow لإرسال Explicit Route Object (ERO) إلى مستوى التحكم GMPLS من خلال رسائل Flow Mod، بدلاً من ذلك، إذا تم إجراء تخصيص RWA من قبل مستوى تحكم GMPLS، فإن المتحكم يحتاج فقط إلى إدراج إدخال تدفق جديد في OFA الدخول، ومن ثم يقوم OFA الدخول بإبلاغ مستوى التحكم GMPLS لإكمال حساب RWA وتوفير المسار الضوئي وفقاً لنتائج RWA التي تم الحصول عليها.

6.3 الحل المتكامل Integrated Solution

يوضح الشكل (8) الحل المتكامل لربط مستويات التحكم OpenFlow/GMPLS وإجراءات توفير المسار من طرف إلى طرف.



الشكل (8) الحل المتكامل لربط مستوى تحكم GMPLS مع مستوى تحكم OpenFlow

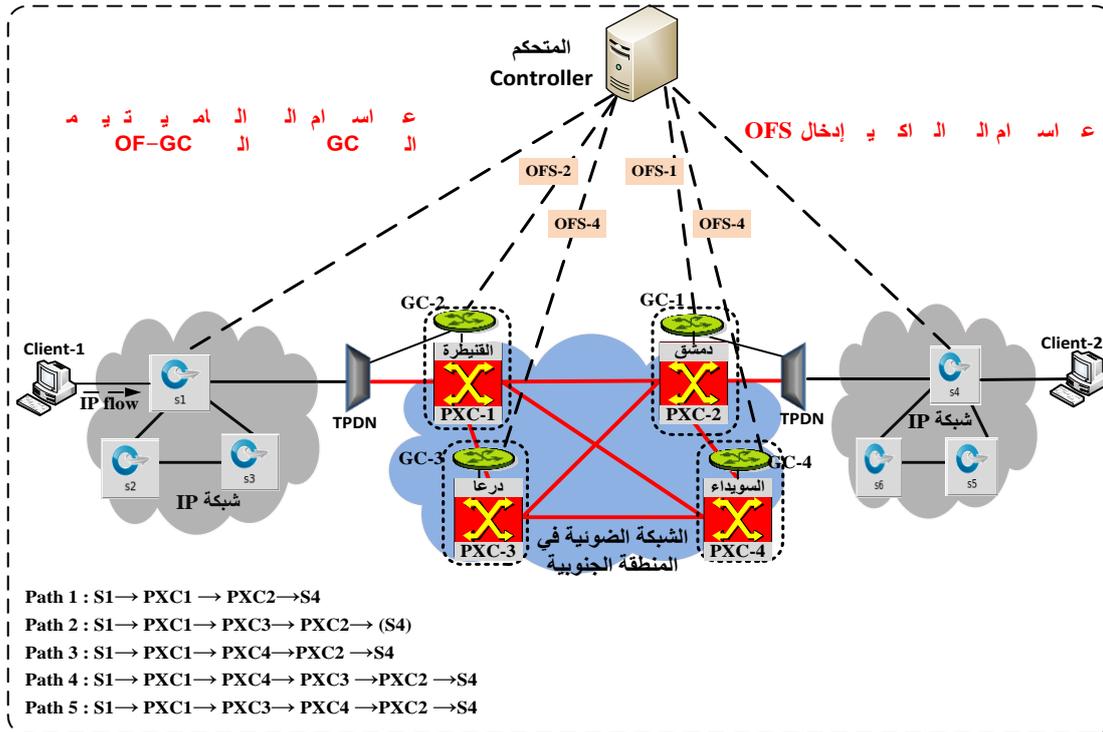
على خلاف الحل المتراكب، يتم في هذا الحل دمج متحكم GC مع وحدة OFA في نفس المتحكم. تسمى هذه البنية الجديدة OF-GC أي أن متحكم GMPLS يدعم OpenFlow. يستطيع OF-GC التواصل مع المتحكم باستخدام بروتوكول OpenFlow القياسي. يمكن أن نلاحظ بأن إجراءات الحل المتكامل هذه، تشبه إلى حد كبير إجراءات الحل المتراكب، والفرق الوحيد هو أن جميع العمليات بين OFA ومستوى التحكم GMPLS (على سبيل المثال، تسليم ERO) تتم جميعها داخل نفس المتحكم (أي OF-GC)، مما يساعد على تقليل زمن تأخير المعالجة الكلية، على حساب تحميل معالجة أعلى ضمن OF-GC، ذلك لأنه يتم تنفيذ مجموعة بروتوكولات GMPLS ووحدة OpenFlow في متحكم واحد [22].

النتائج والمناقشة:

الإختبار العملي

للتحقق من جدوى وكفاءة الحلول المقترحة، سنعتمد طبولوجيا الشبكة الضوئية ASON/GMPLS المركبة في المنطقة الجنوبية من سوريا والتي تتكون من أربع عقد ضوئية سعة كل منها 10G، ولكن بسبب عدم إمكانية التجريب العملي، لعدم وجود متحكم Controller ومبدلات تدعم OpenFlow سنلجأ إلى محاكاة هذه الشبكة في بيئة افتراضية اعتماداً على المحاكى العالمي Mininet Emulator والمتحكم Nox Controller، ونبنى طبولوجيا الشبكة المبنية في الشكل (9)، والمؤلفة من:

- ✓ أربعة عقد ضوئية (PXC=10G) متصلة مع بعضها بطبولوجيا mesh.
- ✓ مستجيبين (OTU2(TPDN) تم وصلهما إلى كل من PXC1 و PXC2.
- ✓ مبدلين S1, S2 يدعمان البروتوكول OpenFlow متصلين بالمستجيبين TPNDs.
- ✓ تم توصيل جهاز كمبيوتر شخصي إلى كل مبدل كعملاء، من خلال كابلات Ethernet.
- ✓ متحكم Controller



الشكل (9) طبولوجيا شبكة الاختبار

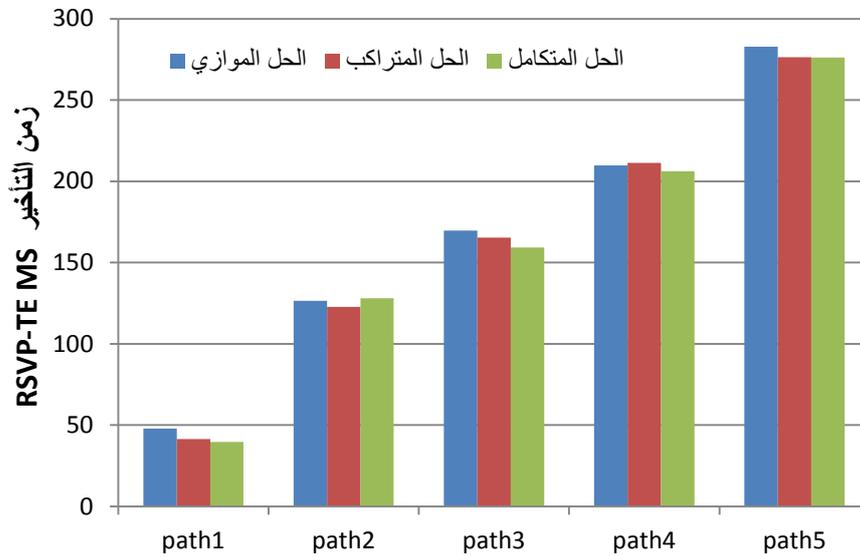
تلخص خطوات التجربة كما يلي:

- يرسل Client-1 تدفقاً إلى الوجهة Client-2.
- نظراً لأن هذا التدفق لن يتطابق مع أي إدخال تدفق موجود في المبدل S1، يقوم S1 بتوجيه رسالة إلى المتحكم تحتوي على الحزمة الأولى من هذا التدفق كحزمة OpenFlow Packet قياسية.
- بعد ذلك، يقوم المتحكم بتنفيذ عملية تخصيص التوجيه وطول الموجه RWA، ومن ثم يبلغ مستوى التحكم GMPLS لإعداد المسار الضوئي وفقاً لنتائج RWA باستخدام الحلول الموازية والمتراكبة والمتكاملة.
- أخيراً، ينتظر المتحكم فترة زمنية محددة مع مراعاة زمن إيصال ERO وزمن تأخير تشوير RSVP-TE والزمن اللازم لتكوين كل من PXC وTPNDs، ثم يقوم بإدراج إدخال تدفق جديد في المبدل S1 لبدء إرسال التدفق باستخدام رسالة Flow Mod.

سنقوم بمقارنة أداء هذه الحلول تجريبياً عن طريق إنشاء المسارات (1,2,3,4,5) بقفزات مختلفة كما هو مبين في الشكل (9). اعتماداً على برنامج Wireshark (الذي يستخدم لأخذ نسخة من البيانات التي تعبر ضمن الشبكة التي تم بناءها بالإعتماد على Mininet) لتحليل تسلسل عمل OpenFlow وتشوير RSVP-TE من أجل إعداد المسار الضوئي باستخدام الحلول الموازية والمتراكبة والمتكاملة، نلاحظ بأن زمن تأخير رسالة OpenFlow قصير جداً، بينما يكون المساهم الرئيسي في زمن التأخير الكلي هو زمن تسليم ERO من المتحكم (أو OFA) إلى مستوى التحكم GMPLS. يبين الجدول (1) نتائج التي حصلنا عليها عبر برنامج Wireshark والتي تمثل زمن انتظار المتحكم حتى يقوم بإدراج التدفق الجديد، والزمن اللازم لحجز المسار الضوئي اعتماداً على البروتوكول RSVP-TE وتم رسم المخطط الموافق له في الشكل (10)، إضافة إلى زمن التأخير الكلي اللازم لحجز المسار الكامل والذي تم رسم المخطط الموافق له في الشكل (11) وذلك بالنسبة لجميع الحلول المقترحة (الموازية، المتراكبة والمتكاملة).

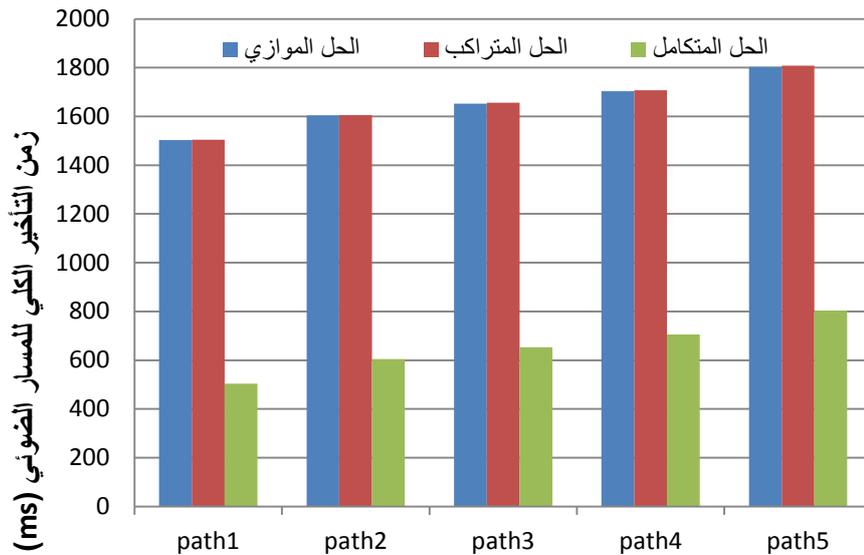
الجدول (1) مقارنة أداء الحلول الثلاثة (الموازي، المتراكب، المتكامل) عن طريق إنشاء المسارات (1,2,3,4,5) وفق الشكل(12)

path	Parallel solution			Overlay solution			Integrated solution		
	controller waiting(ms)	RSVP-TE(ms)	Total (ms)	controller waiting(ms)	RSVP-TE(ms)	Total (ms)	controller waiting(ms)	RSVP-TE(ms)	Total (ms)
1	1500	48.0	1503.3	1500	41.5	1504.8	500	39.7	503.8
2	1600	126.5	1603.6	1600	122.7	1605.9	600	128.0	604.6
3	1650	169.6	1652.2	1650	165.3	1656.4	650	159.2	653.4
4	1700	209.8	1703.3	1700	211.3	1707.2	700	206.2	705.5
5	1800	282.8	1802.8	1800	276.3	1808.4	800	276.2	804.3



المسارات الضوئية في الطبولوجيا المبينة في الشكل (٩)

الشكل(10) زمن تأخير إعداد RSVP-TE للمسارات الضوئية وفق الحلول المختلفة وحسب النتائج في الجدول(1)



المسارات الضوئية في الطبولوجيا المبينة في الشكل (٩)

الشكل (11) مقارنة إداء زمن التأخير الكلي لإعداد المسارات الضوئية وفق الحلول المختلفة لتكامل مستويات التحكم GMPLS و OpenFlow وحسب نتائج في الجدول (1)

نلاحظ من هذه النتائج بأن زمن التأخير الخاص بإعداد حجز المسار الضوئي وفق البروتوكول RSVP-TE هو تقريباً ذاته بالنسبة للحلول الثلاثة (الموازية والمتراكبة والمتكاملة). أما بالنسبة لزمن تأخير تزويد المسار الكلي Overall (OPPL) path provisioning latency، نلاحظ بأنه لدى الحل الموازي والمتراكب أداء مشابه، وهو أطول بكثير من زمن التأخير الخاص بالنهج المتكامل. وذلك لأنه في حالة الحلول الموازية والمتراكبة، يتم الفصل بين المتحكم (OFA) ومتحكم (GC) GMPLS، لذلك فإن الزمن الذي يحتاجه المتحكم (OFA) لإرسال/تكوين ERO إلى متحكم GC البعيد يكون طويلاً.

الاستنتاجات والتوصيات:

الاستنتاجات

- 1- قدمنا في هذا البحث، باختبار ثلاثة حلول للتشغيل البيني بين مستويات التحكم OpenFlow و GMPLS للتحكم الذكي في المسار الضوئي في طبولوجيا تحاكي الشبكة الضوئية المركبة في المنطقة الجنوبية لسوريا.
- 2- الحل الموازي للربط الشبكي بين مستويي التحكم OpenFlow/GMPLS: يعتبر الحل الموازي هو الطريقة الأمثل لتشغيل مستويي التحكم OpenFlow/GMPLS مع بعض. لكن الواجهة بين المتحكم ومستوى تحكم GMPLS لا تعتمد على بروتوكول قياسي، هذا يسبب مشاكل خطيرة في التشغيل المتداخل متعدد الموردين، كما يجب إدخال رسائل وبروتوكولات جديدة إلى المتحكم مما يزيد تعقيد التصميم. لمعالجة هذه المشكلات، تم إقتراح الحل المتراكب.
- 3- الحل المتراكب للربط الشبكي بين مستويي التحكم OpenFlow/GMPLS: باستخدام هذا الحل، يتم إدخال وكيل OFA بين المتحكم وكل متحكم من متحكمات (GC) GMPLS. وبذلك، يصبح المتحكم قادراً على التحكم في

كل من طبقة IP والطبقات الضوئية من خلال البروتوكول OpenFlow، وهو مفيد في معالجة مشاكل قابلية التشغيل البيئي متعددة الموردين وتبسيط تصميم المتحكم.

4- الحل المتكامل للربط الشبكي بين مستويي التحكم OpenFlow/GMPLS: يتم في هذا الحل دمج GC وOFS في نفس المتحكم. لذا أصبح بإمكان OF-GC التواصل مع المتحكم باستخدام بروتوكول OpenFlow القياسي. مما يساعد على تقليل زمن تأخير المعالجة الكلية.

5- أظهرت النتائج بأن الحل المتكامل يتفوق على الحلول الموازية والتراكمية من حيث زمن التأخير الكلي لتوفير المسار (OPPL)، على حساب التعقيد العالي للتصميم وحمل المعالجة داخل المتحكم .

التوصيات

- ضرورة اعتماد طرق مرحلية لتشغيل الشبكات الضوئية الحالية ASON\GMPLS في حال الانتقال إلى تقنية الشبكات المعرفة بالبرمجيات SDN، ريثما تصبح SDN\OpenFlow قادرة على إدارة الشبكات الضوئية متعددة الطبقات بشكل كامل، لأن كلفة البنية التحتية للشبكة الضوئية باهظة التكاليف.
- من بين الحلول التي قدمناها لتكامل مستوى تحكم المجال الضوئي GMPLS مع مستوى تحكم OpenFlow يمكن اعتماد الحل المتكامل لأنه يتفوق على الحلول الموازية والمتراكبة من حيث زمن التأخير الكلي لتوفير المسار، على حساب تعقيد تصميم وحمل المعالجة داخل المتحكم OF-GC.

References:

- [1] DAS, S.; PARULKAR, G.; MCKEOWN, N. *Why OpenFlow/SDN can succeed where GMPLS failed*. In European conference and exhibition on optical communication (pp. Tu-1). Optical Society of America, 2012.
- [2] GRINGERI, S.; BITAR, N.; XIA, T. J. *Extending software defined network principles to include optical transport*. IEEE Communications Magazine, 51(3), 2013, 32-40.
- [3] BENZEKKI, K.; EL FERGOUGUI, A.; ELBELRHITI ELALAOUI, A. *Software defined networking (SDN): a survey*. Security and communication networks, 9(18), 2016, 5803-5833.
- [4] LIU, L.; ZHANG, D.; TSURITANI, T.; VILALTA, R., CASELLAS, R., HONG, L.; MUNOZ, R. *Field trial of an OpenFlow-based unified control plane for multilayer multigranularity optical switching networks*. Journal of lightwave technology, 31(4), 2012, 506-514.
- [5] FARHADY, H.; LEE, H.; NAKAO, A. *Software-defined networking: A survey*. Computer Networks, 81, 2015, 79-95.
- [6] DE ALMEIDA AMAZONAS, J. R.; SANTOS-BOADA, G.; SOLÉ-PARETA, J. *A critical review of OpenFlow/SDN-based networks*. IEEE, In 2014 16th International Conference on Transparent Optical Networks (ICTON), 2014, (pp. 1-5).
- [7] SINGH, S.; JHA, R. K. *A survey on software defined networking: Architecture for next generation network*. Journal of Network and Systems Management, 25(2), 2017, 321-374.
- [8] 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.

- [9] CASELLAS, R.; MUNOZ, R.; MARTÍNEZ, R.; VILALTA, R.; MAYORAL, A.; LIU, L.; MORITA, I. *Overarching control of flexi grid optical networks: Interworking of GMPLS and OpenFlow domains*. Journal of Lightwave Technology, 33(5),2015, 1054-1062.
- [10] [AZODOLMOLKY, S.; NEJABATI, R.; ESCALONA, E.; JAYAKUMAR, R.; EFSTATHIOU, N.; SIMEONIDOU, D. *Integrated OpenFlow–GMPLS control plane: an overlay model for software defined packet over optical networks*. Optics express, 19(26),2011, B421-B428.
- [11] BRUNGARD, D. *Requirements for Generalized Multi-Protocol Label Switching (GMPLS) Routing for the Automatically Switched Optical Network (ASON)*. RFC 4258, 2005.
- [12] GOPALAKRISHNA, S.; CHAKRABARTY, M.; FREESTONE, B. *U.S. Patent No. 8,665,889*. Washington, DC: U.S. Patent and Trademark Office,2014.
- [13] Mannie, E. *Generalized multi-protocol label switching (GMPLS) architecture*. 2004.
- [14] KUMAKI, K. *Interworking Requirements to Support operation of MPLS-TE over GMPLS networks*. RFC 5146, 2008.
- [15] 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.
- [16] HU, F.; HAO, Q.; BAO, K. *A survey on software-defined network and openflow: From concept to implementation*. IEEE Communications Surveys & Tutorials, 16(4), 2014, 2181-2206.
- [17] SUZUKI, K.; SONODA, K.; TOMIZAWA, N.; YAKUWA, Y.; UCHIDA, T.; HIGUCHI, Y.; SHIMONISHI, H. *A survey on OpenFlow technologies*. IEICE Transactions on Communications, 97(2),2014, 375-386.
- [18] LI, Y.; KILPER, D. C. *Optical physical layer SDN*. Journal of Optical Communications and Networking, 10(1), 2018,A110-A121.
- [19] GUDE, N.; KOPONEN, T.; PETTIT, J.; PFAFF, B.;CASADO, M.; MCKEOWN, N.; SHENKER, S. *NOX: towards an operating system for networks*. ACM SIGCOMM Computer Communication Review, 38(3),2008, 105-110.
- [20] LEE, Y.; BERNSTEIN, G.; LI, D.; IMAJUKU, W. *Routing and wavelength assignment information model for wavelength switched optical networks*. draft-ietf-ccamp-rwa-info work in progress,2010.
- [21] LIU, L.; TSURITANI, T.; MORITA, I. *Experimental demonstration of OpenFlow/GMPLS interworking control plane for IP/DWDM multi-layer optical networks*. In 2012 14th International Conference on Transparent Optical Networks (ICTON), IEEE,2012, (pp. 1-4).
- [22] MUÑOZ, R.; VILALTA, R., CASELLAS, R.; MARTÍNEZ, R.; FRANCOIS, F.; CHANNEGOWDA, M.; YOSHIKANE, N. *Transport network orchestration for end-to-end multilayer provisioning across heterogeneous SDN/OpenFlow and GMPLS/PCE control domains*. Journal of Lightwave Technology, 33(8),2015, 1540-1548.