

دراسة مقترح تحسين أداء الشبكة الاتصالية الضوئية السورية عن طريق النموذج الرياضي لعملية التوجيه وإسناد طول الموجة في شبكات WDM الضوئية

د. محمد الحسين*

يامن عياش**

(تاريخ الإيداع 5 / 11 / 2018. قُبِلَ للنشر في 13 / 12 / 2018)

□ ملخص □

يتم الإرسال في شبكة WDM باستخدام مسارات ضوئية، بحيث يمتلك كل مسار ضوئي توجيهه الخاص عبر الشبكة بالإضافة إلى طول مميز لهذا المسار. وفي حال عدم وجود طول موجي مشترك عبر كامل المسار الضوئي يتم قطع الاتصال. وتعرف مسألة إيجاد التوجيه الطول الموجي لكل مسار بمسألة التوجيه وإسناد طول الموجة RWA [1]. تُمكن البرمجة الخطية بالأعداد الصحيحة (ILP) Integer Linear Programming من تمثيل مسألة RWA رياضياً. وذلك عن طريق تحديد كل التوجيهات والأطوال الموجية للمسارات الضوئية المطلوبة بأقل عدد ممكن من الأطوال الموجية. حيث تعتبر ILP أحد تقنيات الأمثلة أو التحسين Optimization الرياضية والتي تقوم بإيجاد القيمة العظمى أو القيمة الدنيا لتابع مكوّن من مجموعة من المتحوّلات الحقيقية الموجبة المحكومة بقيود خطية إضافية. يهدف هذا البحث إلى تحليل أداء الشبكة الضوئية السورية للاتصالات عن طريق ILP والعمل على تحسين بنية هذه الشبكة، وذلك من أجل الحصول على أفضل أداء ممكن من حيث الحجب والاستخدام الأمثل للموارد المتاحة.

الكلمات المفتاحية: التوجيه الضوئي، التوجيه وإسناد طول الموجة، شبكات DWDM، ILP، الشبكة الضوئية السورية للاتصالات.

*مدرس قسم هندسة الاتصالات والإلكترونيات - كلية الهندسة الميكانيكية والكهربائية - جامعة دمشق - دمشق - سورية.
طالب دراسات عليا (ماجستير) قسم هندسة الاتصالات والإلكترونيات - كلية الهندسة الميكانيكية والكهربائية - جامعة دمشق - دمشق - سورية**

Proposal study to improve the performance of Syrian telecommunication optical networks using Routing and Wavelength Assignment (RWA) mathematical model in WDM optical networks

**Dr. Mohammad Alhousain.
Yamen Ayash**

(Received 5 / 11 / 2018. Accepted 13 / 12 / 2018)

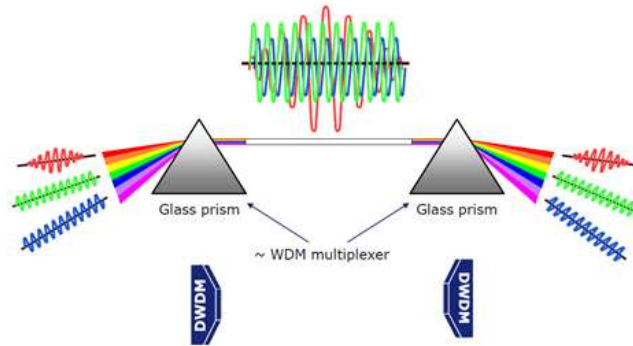
□ ABSTRACT □

In WDM networks, the end users exchange information with each other through all optical WDM channels, called light-paths. A light-path must occupy the same wavelength on all the fiber links through which it traverses. In a WDM optical network, with a given set of connections, the question of setting up light-paths by routing and allocating a wavelength to each connection is called Routing and Wavelength Assignment (RWA) problem. Integer Linear Programming (ILP) is a mathematical formulation helps in minimizing and maximizing an object function under multiple constraints. This can help in formulating a mathematical model for RWA. This paper studies a mathematical model for RWA in WDM Optical networks which can lead to a good network planning. This paper suggests an enhancement proposal for Syrian telecommunication optical networks using ILP formulation.

Key words: RWA, optical network, DWDM, ILP.

مقدمة:

تطوّرت أنظمة الاتصالات الضوئية في العقود الأخيرة بشكل كبير جداً، فلم تعد مهمّة الألياف الضوئية إيصال الضوء إلى أماكن يصعب الوصول إليها وإنما أصبحت الوسط المادي الذي يستطيع نقل المعطيات بسرعات عالية جداً ومسافات كبيرة من عشرات إلى بضع مئات الكيلومترات. ويعتبر التصميم بالاقتران الموجهي Wavelength Division Multiplexing (WDM) أحد أهم التقنيات المفيدة والمساعدة في الأداء الجيد للشبكات الضوئية. وقد لاقت شبكات WDM الضوئية مؤخراً انتشاراً وقبولاً واسعاً كونها قادرة على تلبية متطلبات المستخدمين المتزايدة والمتسارعة من أجل الحصول على تحقيق سرعات نقل عالية. حيث يتم في WDM مزج أكثر من إشارة ضوئية مختلفة طول الموجة باستخدام مزج (Multiplexer) ثم ترسل عبر الليف الضوئي وعند المستقبل يتم فصل الأطوال باستخدام (Demultiplexer). يبيّن الشكل (1) نموذج مبسّط لنظام مزج الإشارات الضوئية في الليف. يتم إرسال الرسالة في شبكة WDM من عقدة إلى أخرى باستخدام مسار ضوئي (توجيه مستمر لطول الموجة) ويجب على المسار الضوئي أن يكون مستمراً بالنسبة لطول الموجة. وفي حال عدم وجود طول موجة مشترك عبر كامل المسار يتم قطع الاتصال وتدعى هذه المشكلة بمشكلة الحجب Blocking [2]. وقد أثبتت الدراسات أنّ مسألة RWA في شبكات WDM الضوئية هي مسألة NP-hard [3,4] أي أنّه لا توجد خوارزمية متعدّدة الحدود Polynomial algorithm قادرة على إيجاد حل صريح للمسألة وأنّ الزمن اللازم لحل المسألة يتزايد بشكل أسّي مع زيادة حجم المسألة [5]. لذلك فإنّ الخوارزميات التجريبية Heuristic هي أفضل طريقة لتجاوز هذه المشكلة. وعلى ضوء ذلك، هناك عدد كبير من التجارب التي قام بها الباحثون لحل مسألة RWA. وللأسف فإنّ هذه التجارب لم تتمكّن من تحسين أداء الشبكة أكثر من حد معيّن [10].



الشكل (1): نظام مزج WDM للأموال الضوئية.

تقوم بعض الدراسات على حل مسألة RWA عبر نمذجتها بشكلٍ رياضي وإجراء عملية Optimization لتابع الهدف المطلوب. وذلك من أجل تخفيض معدّل الحجب في الشبكة (جعل الاتصالات المقبولة في الشبكة أعظم مايمكن) [6,7,8,9]. أو تخفيض عدد الأطوال الموجية المستخدمة إلى الحد الأدنى [9,10]، تخفيض عدد الأطوال الموجية المستخدمة في ليف ضوئي واحد [9, 10] وغير ذلك من الأهداف ويتم إيجاد الحل الأمثل لهذه الأهداف عن طريق استخدام Integer Linear Programming (ILP) بوجود قيود وشروط مختلفة على حل المسألة.

أهمية البحث وأهدافه:

تتمتع شبكات WDM الضوئية بالعديد من الموصفات الجيدة والتي تجعلها الخيار الأول والمفضل أمام مصممي شبكات الاتصال وذلك لمواكبة الاستخدام الكثيف للإنترنت والنمو السريع للاتصالات حول العالم. حيث تتيح شبكات WDM الضوئية عرض حزمة مرتفع، تخميد وتشويه إشارة منخفض، إرسال متزامن للمعطيات على قنوات WDM، بالإضافة لكونها أسرع بكثير مقارنةً بالشبكات السلكية غير الضوئية [5]. يتواصل المستخدمون النهائيون (end-users) في شبكات WDM الضوئية فيما بينهم عبر مسارات ضوئية [11,12]. وتدعى مسألة إنشاء مسار ضوئي لكل طلب اتصال عبر اختيار التوجيه الأمثل وإسناد طول الموجة المناسب له بمسألة التوجيه وإسناد طول الموجة RWA. وتعتبر RWA من الوظائف الأساسية في الشبكات الضوئية وتستخدم لاختيار أفضل خيار ممكن للمسارات نهاية لنهاية وإسناد الأطوال الموجية الملائمة لطلبات الاتصال المختلفة. يهدف هذا البحث لدراسة النموذج الرياضي ILP لمسألة RWA وتحليل أداء الشبكة الضوئية السوربية للاتصالات عن طريق ILP والعمل على إيجاد مقترح لتحسين بنية هذه الشبكة من أجل الحصول على أفضل أداء ممكن من حيث الحجب وتوزيع أمثلي للموارد المتاحة.

منهجية البحث:

تم في هذا البحث بدايةً شرحاً وافياً عن نمذجة مسألة RWA باستخدام صيغة ILP. وينتقل بعد ذلك إلى شرح بنية الشبكة الضوئية السوربية للاتصالات معرّفاً المعاملات الأساسية المستخدمة من أجل إجراء المحاكاة. يتجه البحث بعد ذلك إلى محاكاة RWA ضمن الشبكة الضوئية السوربية للاتصالات باستخدام صيغة ILP. وعلى ضوء نتائج هذا البحث تم اقتراح عدة بنى مختلفة لتحسين أداء الشبكة، ويختار أفضل بنية تعطي استخدام أمثلي لموارد الشبكة. يتم إجراء المحاكاة باستخدام البيئة البرمجية Matlab بمساعدة مخدم Tomlab/Cplex والذي يساهم في تسريع العمليات الحسابية في ILP.

1. النموذج الرياضي لأمتلة RWA باستخدام البرمجة الخطية بالأعداد الصحيحة:

يمكن النظر إلى مسألة RWA على أنها تحديد كل التوجيهات والأطوال الموجية للمسارات الضوئية المطلوبة بأقل عدد ممكن من الأطوال الموجية. ولتحقيق هذه المهمة يمكن استخدام البرمجة الخطية بالأعداد الصحيحة Integer Linear Programming (ILP) لتمثيل مسألة RWA رياضياً. حيث تعتبر ILP أحد تقنيات الأمثلة أو التحسين Optimization الرياضية بحيث يكون الهدف منها هو إيجاد القيمة العظمى أو القيمة الدنيا لتابع مكون من مجموعة من المتحولات الحقيقية الموجبة المحكومة بقيود خطية إضافية. ويمكن أن تستخدم ILP لإيجاد توجيه فقط أو لحل مسألة RWA كاملةً وذلك بهدف:

- تخفيض معدّل الحجب إلى الحد الأدنى.
 - تخفيض عدد الأطوال الموجية المستخدمة إلى الحد الأدنى.
 - تخفيض الازدحام إلى الحد الأدنى.
 - تخفيض حمل الشبكة إلى الحد الأدنى.
- نناقش في هذه الدراسة حالة تخفيض معدّل الحجب إلى الحد الأدنى (أكبر قدر ممكن من الاتصالات المقبولة).

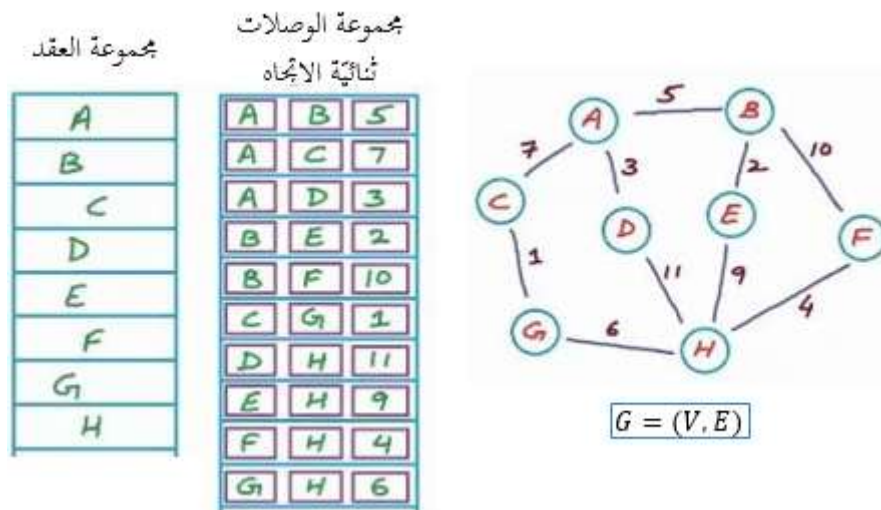
2. تشكيل مسألة RWA:

من أجل تشكيل مسألة RWA يتم تمثيل شبكة الألياف الضوئية بالمبيان $G = (V, E)$ حيث تمثل المجموعة $V = \{v_1, v_2, \dots, v_n\}$ مجموعة العقد في الشبكة، والمجموعة $E = \{e_1, e_2, \dots, e_n\}$ مجموعة من الحواف Edges تمثل كل واحدة منها وصلة (أو ليف ضوئي) في الشبكة يصل بين عقدتين. يكون عدد الحواف من عقدة v_i إلى عقدة v_j مساوياً لعدد الألياف كما هو مبين في الشكل (2). وبأخذ المتحولات الرياضية التالية:

$$x_k = \begin{cases} 1 & \text{إذا كان الاتصال } k \text{ مسموح} \\ 0 & \text{حالة أخرى} \end{cases} \quad (1)$$

$$x_k^\lambda = \begin{cases} 1 & \text{إذا كان طول الموجة } \lambda \text{ يدعم الاتصال } k \\ 0 & \text{حالة أخرى} \end{cases} \quad (2)$$

$$x_{ke}^\lambda = \begin{cases} 1 & \text{إذا كان طول الموجة } \lambda \text{ يدعم الاتصال } k \text{ على القوس } e \\ 0 & \text{حالة أخرى} \end{cases} \quad (3)$$



الشكل (2): مثال على مبيان شبكة ضوئية.

فإنه يمكن تقديم صيغة لحل مسألة RWA بهدف جعل عدد الاتصالات المقبولة أعظمياً (احتمال حجب أصغري) كما في [13] كالتالي:

$$\max Z_{RWA}(x) = \sum_{k \in K} x_k \quad (4)$$

وذلك وفق الشروط:

$$\sum_{+ e \in \omega(v_i)} x_{ke}^\lambda = \sum_{e \in \omega(v_i)} x_{ke}^\lambda ; \quad \begin{matrix} k \in K, \lambda \in \Lambda, v_i \\ \in V \\ \setminus \{s_k, d_k\} \end{matrix} \quad (5)$$

$$\sum_{+ e \in \omega(s_k)} x_{ke}^\lambda - \sum_{e \in \omega(s_k)} x_{ke}^\lambda = x_k^\lambda ; \quad k \in K, \lambda \in \Lambda \quad (6)$$

$$\sum_{e \in \omega^+(d_k)} x_{ke}^\lambda - \sum_{e \in \omega^-(d_k)} x_{ke}^\lambda = x_k^\lambda; \quad k \in K, \lambda \in \Lambda \quad (7)$$

$$\sum_{k \in K} x_{ke}^\lambda \leq 1; \quad e \in E, \lambda \in \Lambda \quad (8)$$

$$\sum_{\lambda \in \Lambda} x_k^\lambda = x_k; \quad k \in K \quad (9)$$

$$x_{ke}^\lambda \leq x_k^\lambda; \quad k \in K, e \in E, \lambda \in \Lambda \quad (10)$$

$$x_k, x_k^\lambda, x_{ke}^\lambda \in \{0,1\}; \quad k \in K, e \in E, \lambda \in \Lambda \quad (11)$$

تتعلق الشروط الثلاثة الأولى الممثلة بالمعادلات (5) إلى (7) بشروط الاستمرارية. بينما يتعلق الشرط الرابع (8) بعدم التصادم (أي لا يوجد مسارين ضوئيين على نفس الحافة e يتشاركان نفس طول الموجة. الشرط الخامس (9) يضمن أنه في حال تعريف مسار ضوئي لاتصال k فيمكن تخصيص طول موجة واحد فقط لهذا المسار. وأخيراً فإن الشرط السادس (10) يضمن التناسق بين المتغيرات x_{ke}^λ .
3. الشبكة الضوئية السورية للاتصالات:

يبين الشكل (3) بنية شبكة الاتصالات السورية والمكوّنة من 13 عقدة تتوزع في غالب المحافظات السورية و15 وصلة ضوئية ثنائية الاتجاه تصل عقد الشبكة مع بعضها البعض. كما يبين الجدول (1) أطوال الألياف الضوئية الواصلة بين عقد الشبكة مقاسة بالكيلومتر.

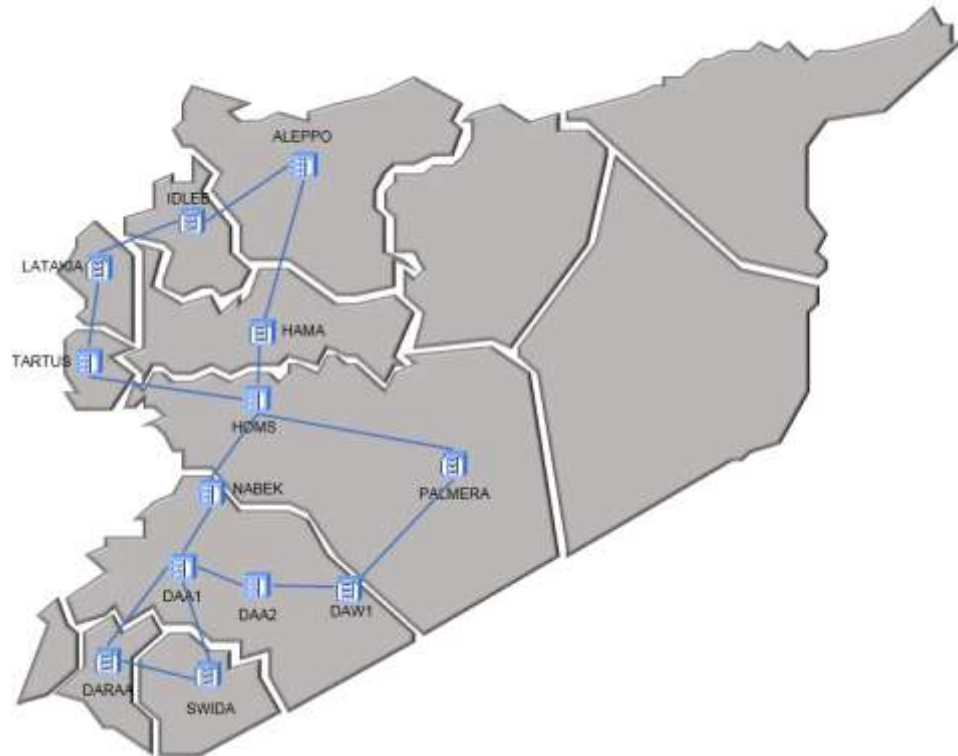
وللقيام بمحاكاة RWA في الشبكة باستخدام التمثيل الرياضي ILP فإننا بحاجة هنا إلى معرفة النقل ومصفوفة المرور في الشبكة وقد تم بناء مصفوفات نقل للشبكة تمثل عدّة حالات للاتصال في الشبكة كالتالي:

- نقل إنترنت معتدل: حيث تتكوّن مصفوفة النقل من كمّية المعطيات المتبادلة بين بوابات الإنترنت في العقدين LATAKIA و TARTUS وبين باقي العقد في الشبكة وتقاس كمّية المعطيات هنا بالغيغابت بالثانية (Gbps). يبين الجدول (2) مصفوفة النقل من أجل نقل إنترنت بشكل معتدل. ونقصد هنا بالمعتدل أن يكون متوسط كمّية المعطيات المتبادلة بين كل عقدة وبوابة الإنترنت حوالي 35 Gbps.

- نقل إنترنت كثيف: وهنا تكون كمّية المعطيات المتبادلة بين عقد الشبكة وعقد البوابات منخفضة كما يبين الجدول (3). ويكون متوسط كمّية المعطيات المتبادلة بين كل عقدة وبوابة الإنترنت حوالي 60 Gbps.

- نقل معطيات منخفض على كامل الشبكة: تكون كمّية المعطيات المنقولة في الشبكة منخفضة. ويبين الجدول (4) مصفوفة النقل من أجل نقل معطيات منخفضة على كامل الشبكة.

- نقل معطيات كثيف على كامل الشبكة: تكون كمّية المعطيات المنقولة في الشبكة مرتفعة. ويبين الجدول (5) مصفوفة النقل من أجل نقل معطيات منخفضة على كامل الشبكة.



الشكل (3): شبكة الاتصالات الضوئية السورية.

الجدول (1): أطوال الألياف الضوئية بين المحافظات بالكيلومتر.

DAA1	DAA2	2
DAA1	SWIDA	106
DAA1	DARAA	101
DAA1	NABEK	81
DAA2	DAW1	34
SWIDA	DARAA	68
DAW1	PALMERA	179
HOMS	PALMERA	155
HOMS	HAMA	47
HOMS	TARTUS	96
HOMS	NABEK	81
HAMA	ALEPPO	146
IDLEB	ALEPPO	59
IDLEB	LATAKIA	132
TARTUS	LATAKIA	90

يتم في الجداول التالية تمثيل أرقام العقد كالتالي:

7	6	5	4	3	2	1
Nabek	Hama	Homs	Tartus	Latakia	Idleb	Aleppo

13	12	11	10	9	8
Palmera	DAWI	DAA2	Swida	Daraa	DAA1

الجدول (2): مصفوفة النقل من أجل نقل إنترنت منخفض.

13	12	11	10	9	8	7	6	5	4	3	2	1	
0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	13.748	0.782	0.000	0.000	1
0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	11.643	9.311	0.000	0.000	2
2.417	1.743	7.739	12.583	16.599	14.048	11.961	8.113	6.250	21.756	0.000	6.329	5.810	3
1.245	8.454	4.004	16.645	19.439	12.390	15.832	7.811	12.793	0.000	16.292	12.956	13.264	4
0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	19.292	14.121	0.000	0.000	5
0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	7.322	10.882	0.000	0.000	6
0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	15.574	8.177	0.000	0.000	7
0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	11.413	12.650	0.000	0.000	8
0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	13.203	11.430	0.000	0.000	9
0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	17.735	9.859	0.000	0.000	10
0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	1.380	14.203	0.000	0.000	11
0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	7.672	11.825	0.000	0.000	12
0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	5.779	9.625	0.000	0.000	13

الجدول (3): مصفوفة النقل من أجل نقل إنترنت كثيف.

13	12	11	10	9	8	7	6	5	4	3	2	1	
0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	54.728	62.782	0.000	0.000	1
0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	62.643	42.311	0.000	0.000	2
22.417	41.743	57.739	52.583	66.599	64.048	35.961	48.113	62.250	55.756	0.000	67.329	75.810	3
32.245	81.454	44.004	54.645	89.439	76.390	55.832	75.811	98.793	0.000	72.292	62.956	52.264	4
0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	89.292	53.121	0.000	0.000	5
0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	70.322	10.882	0.000	0.000	6
0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	55.574	63.177	0.000	0.000	7
0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	78.443	12.650	0.000	0.000	8
0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	41.203	13.430	0.000	0.000	9
0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	71.735	9.859	0.000	0.000	10
0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	91.380	34.203	0.000	0.000	11
0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	70.672	25.825	0.000	0.000	12
0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	55.779	49.625	0.000	0.000	13

الجدول (4): مصفوفة النقل من أجل نقل معطيات منخفضة على كامل الشبكة.

13	12	11	10	9	8	7	6	5	4	3	2	1	
4.923	8.332	4.857	1.790	7.669	7.710	3.464	5.278	9.397	0.182	2.751	3.474	0.000	1
6.947	3.983	8.944	3.390	9.345	0.427	8.865	4.116	3.545	6.838	2.486	0.000	5.710	2
9.727	7.498	1.375	2.101	1.079	3.782	4.547	6.026	4.106	7.837	0.000	3.839	1.769	3
3.278	8.352	3.900	5.102	1.822	7.043	4.134	7.505	9.843	0.000	2.277	6.273	9.574	4
8.378	3.225	9.274	9.064	0.991	7.295	2.177	5.835	0.000	8.854	8.044	0.216	2.653	5
7.391	5.523	9.175	6.289	4.898	2.243	1.257	0.000	6.766	8.990	9.861	9.106	9.246	6
9.542	9.791	7.136	1.015	1.932	2.691	0.000	5.836	9.883	6.259	0.300	8.006	2.238	7
0.319	5.493	6.183	3.909	8.959	0.000	7.261	5.118	7.668	1.379	5.357	7.458	3.736	8
3.569	3.304	3.433	0.546	0.000	4.775	7.829	0.826	3.367	2.178	0.871	8.131	0.875	9
6.627	6.195	9.360	0.000	0.442	6.237	6.938	7.196	6.624	1.821	8.021	3.833	6.401	10
2.815	3.606	0.000	4.317	5.573	2.364	0.098	9.962	2.442	0.418	9.891	6.173	1.806	11
2.304	0.000	7.306	9.976	7.725	1.771	8.432	3.545	2.955	1.069	0.669	5.755	0.451	12

0.000	4.139	6.465	8.116	3.119	8.296	9.223	9.713	6.802	6.164	9.394	5.301	7.232	13
-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	----

الجدول (5): مصفوفة النقل من أجل نقل معطيات كثيفة على كامل الشبكة.

13	12	11	10	9	8	7	6	5	4	3	2	1	
60.963	67.323	78.442	40.673	52.120	98.090	64.681	92.274	79.468	26.844	66.712	13.860	0.000	1
57.474	66.428	88.284	66.693	37.231	28.662	30.775	80.037	54.491	25.785	58.644	0.000	59.061	2
32.604	12.281	91.371	93.373	93.713	80.082	13.872	28.595	68.622	33.167	0.000	36.616	66.044	3
45.642	40.732	55.828	81.095	82.953	89.611	47.557	54.366	89.363	0.000	36.102	80.676	4.755	4
71.380	27.529	59.887	48.455	84.909	59.753	36.246	98.478	0.000	34.801	62.028	50.378	34.878	5
88.441	71.667	14.888	75.675	37.253	88.402	78.811	0.000	30.366	12.166	81.115	48.959	45.134	6
72.086	28.338	89.971	41.705	59.318	94.373	0.000	83.897	4.619	88.415	1.926	87.705	24.090	7
1.861	89.620	45.039	97.179	87.255	0.000	66.851	43.326	19.548	9.428	8.387	35.314	71.505	8
67.478	82.658	20.567	98.797	0.000	72.839	13.350	47.062	72.017	93.004	97.480	44.944	85.618	9
43.851	39.003	89.965	0.000	66.846	57.676	2.156	56.071	72.175	39.902	65.135	96.353	28.151	10
43.782	49.790	0.000	38.888	20.678	2.586	55.984	26.909	87.780	4.740	23.124	4.230	73.105	11
11.704	0.000	88.249	45.474	65.385	44.653	30.082	74.902	58.243	34.237	40.349	97.296	13.776	12
0.000	83.437	28.495	24.669	7.205	64.630	93.941	50.389	7.068	73.597	12.202	18.921	83.672	13

4. محاكاة أداء الشبكة الضوئية السورية للاتصالات:

بداية نعرّف معاملات المحاكاة حيث نفترض هنا وجود 40 طول موجي متاح في كل وصلة من وصلات الشبكة بحيث يعطي كل طول موجي 40 Gbps وبالتالي يمكن لكل وصلة أن تقوم بنقل 1600 Gbps من المعطيات في اتجاه واحد بنفس الزمن. تقوم صيغة ILP بإيجاد بنية وهمية للشبكة وتقوم بإجراء عملية Minimization لاحتمال الحجب وذلك وفق أقل موارد ممكنة لذلك، وإيجاد وحساب هذه البنية من أجل نقل إنترنت منخفض أن البنية الوهمية تحتوي على 30 مسار ضوئي موضحة في الجدول (6). أما في الجدول التالي (7) نجد عدد الأطوال الموجية المستخدمة في وصلات الشبكة ونلاحظ أن متوسط عدد الأطوال الموجية المستخدمة في كل ليف هي 2.86 طول موجي في اللبف الضوئي الواحد ونلاحظ أيضاً أن الوصلة بين العقدة 4 والعقدة 5 تستخدم أكثر عدد من الأطوال الموجية بالإضافة إلى أن الحمل المنقول على هذه الوصلة هو 205.645 Gbps و 256.839 Gbps بالاتجاهين. وبالتالي نلاحظ أن الاختناق في الشبكة يحدث بشكل أساسي عند هذه الوصلة. بالمقابل فإنّ الوصلات [11 12] و [9 10] لا تحتوي على أي نقل للمعطيات.

الجدول (6): المسارات الضوئية الناتجة من أجل حالة نقل إنترنت منخفض.

رقم الضوئي	المسار	العقدة المصدر	العقدة الوجهة	سعة المسار Gbps	كمية المعطيات المنقولة في المسار Gbps
1	3	4	40	40	[3 4]
2	4	9	40	36.038	[4 5 7 8 9]
3	5	4	40	33.413	[5 4]
4	10	4	40	27.594	[10 8 7 5 4]
5	4	10	40	29.228	[4 5 7 8 10]
6	4	3	40	40	[4 3]
7	4	7	40	15.832	[4 5 7]
8	7	4	40	40	[7 5 4]
9	11	3	40	15.583	[11 8 7 5 4 3]
10	3	8	40	18.641	[3 4 5 7 8]
11	1	4	40	14.530	[1 2 3 4]

[4 3 2 1]	19.074	40	1	4	12
[9 8 7 5 4]	24.633	40	4	9	13
[4 3 2]	32.345	40	2	4	14
[4 5]	19.043	40	5	4	15
[8 7 5 4 3]	40	40	3	8	16
[4 5 7 8]	33.051	40	8	4	17
[3 4 5 7]	28.210	40	7	3	18
[12 13 5 4 3]	11.825	40	3	12	19
[2 3 4]	11.643	40	4	2	20
[6 1 2 3]	10.882	40	3	6	21
[13 5 4 3]	15.404	40	3	13	22
[2 3]	22.371	40	3	2	23
[4 5 12 13]	10.197	40	12	4	24
[3 2 1 6]	40	40	6	3	25
[3 4 5 7 8 11]	11.743	40	11	3	26
[12 13 5 4]	7.672	40	4	12	27
[6 5 4]	31.398	40	4	6	28
[8 7 5 4]	9.317	40	4	8	29
[3 4 5 13]	3.662	40	13	3	30

الجدول (7): الأطوال الموجية المستخدمة من أجل حالة نقل إنترنت منخفض.

رقم الوصلة	العقدة المصدر	العقدة الوجهة	الأطوال الموجية المتاحة	الأطوال الموجية المستخدمة	الحمل المنقول عبر الوصلة Gbps
1	1	2	40	2	25.412
2	2	1	40	2	59.074
3	1	6	40	1	40
4	6	1	40	1	10.882
5	2	3	40	4	59.426
6	3	2	40	3	91.419
7	3	4	40	7	128.429
8	4	3	40	7	174.231
9	6	5	40	1	31.398
10	5	6	40	0	0
11	4	5	40	10	205.645
12	5	4	40	11	256.839
13	5	13	40	2	13.859
14	13	5	40	3	34.901
15	12	13	40	2	19.497
16	13	12	40	1	10.197
17	11	12	40	0	0

0	0	40	11	12	18
11.743	1	40	11	8	19
15.583	1	40	8	11	20
36.038	1	40	9	8	21
24.633	1	40	8	9	22
29.228	1	40	10	8	23
27.594	1	40	8	10	24
0	0	40	9	10	25
0	0	40	10	9	26
117.127	5	40	7	8	27
128.701	5	40	8	7	28
157.127	6	40	5	7	29
172.743	7	40	7	5	30

وبإجراء نفس المحاكاة السابقة لتوليد البنية الوهمية من أجل حالات النقل الأخرى، تبين الجداول من (8) و (10) الأطوال الموجية المستخدمة من أجل حالة نقل إنترنت كثيف، نقل شبكة منخفض، ونقل شبكة مرتفع على الترتيب. في حين يحتوي الجدول (11) على مقارنة بين أهم المعاملات الناتجة في حالات النقل المختلفة.

الجدول (8): الأطوال الموجية المستخدمة من أجل حالة نقل إنترنت كثيف.

رقم الوصلة	العقدة المصدر	العقدة الوجهة	الأطوال الموجية المتاحة	الأطوال الموجية المستخدمة	الحمل المنقول عبر الوصلة Gbps
1	1	2	40	5	122.246
2	2	1	40	6	175.530
3	1	6	40	2	43.924
4	6	1	40	1	1.204
5	2	3	40	8	239.871
6	3	2	40	10	318.486
7	3	4	40	18	608.903
8	4	3	40	17	487.327
9	6	5	40	2	80
10	5	6	40	2	80
11	4	5	40	30	1082.373
12	5	4	40	30	962.199
13	5	13	40	6	202.080
14	13	5	40	7	226.122
15	12	13	40	3	96.497
16	13	12	40	4	123.197
17	11	12	40	0	0
18	12	11	40	0	0
19	8	11	40	3	101.743
20	11	8	40	4	125.583

156.038	4	40	9	8	21
54.633	2	40	8	9	22
107.228	3	40	10	8	23
81.594	3	40	8	10	24
0	0	40	9	10	25
0	0	40	10	9	26
352.903	12	40	7	8	27
505.447	14	40	8	7	28
484.144	16	40	5	7	29
609.730	17	40	7	5	30

الجدول (9): الأطوال الموجية المستخدمة من أجل حالة نقل شبكة منخفض

رقم الوصلة	العقدة المصدر	العقدة الوجهة	الأطوال المتاحة	الموجبة	الأطوال المستخدمة	الموجبة	الحمل المنقول عبر الوصلة Gbps
1	1	2	40	40	4	139.596	
2	2	1	40	40	2	45.936	
3	1	6	40	40	4	105.102	
4	6	1	40	40	6	190.626	
5	2	3	40	40	4	130.106	
6	3	2	40	40	1	39.415	
7	3	4	40	40	5	183.160	
8	4	3	40	40	3	98.705	
9	6	5	40	40	6	136.635	
10	5	6	40	40	7	212.370	
11	4	5	40	40	6	214.094	
12	5	4	40	40	4	112.525	
13	5	13	40	40	5	132.357	
14	13	5	40	40	5	157.025	
15	12	13	40	40	2	46.524	
16	13	12	40	40	1	40	
17	11	12	40	40	3	64.007	
18	12	11	40	40	1	40	
19	8	11	40	40	7	202.305	
20	11	8	40	40	5	150.355	
21	8	9	40	40	4	95.775	
22	9	8	40	40	3	81.925	
23	8	10	40	40	3	100.019	
24	10	8	40	40	6	114.099	
25	10	9	40	40	0	0	
26	9	10	40	40	0	0	

286.666	11	40	7	8	27
330.180	11	40	8	7	28
362.141	12	40	5	7	29
405.251	12	40	7	5	30

الجدول (10): الأطوال الموجية المستخدمة من أجل حالة نقل شبكة كثيف.

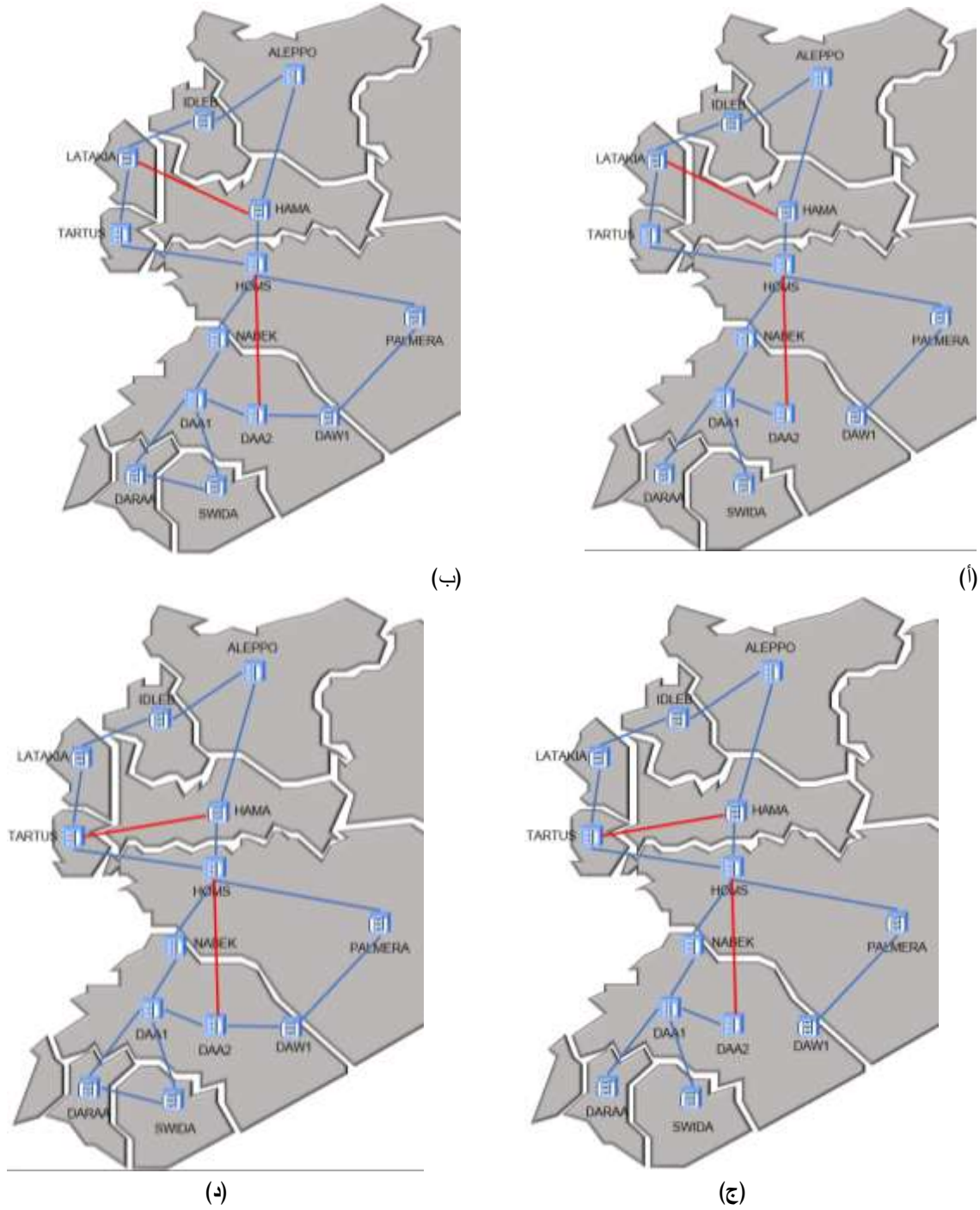
رقم الوصلة	العقدة المصدر	العقدة الوجهة	الأطوال الموجية المتاحة	الأطوال الموجية المستخدمة	الحمل المنقول عبر الوصلة Gbps
1	1	2	40	19	758.680
2	2	1	40	7	280
3	1	6	40	18	720
4	6	1	40	28	1102.034
5	2	3	40	16	640
6	3	2	40	6	240
7	3	4	40	22	880
8	4	3	40	11	431.967
9	6	5	40	24	957.214
10	5	6	40	37	1457.769
11	4	5	40	35	1322.670
12	5	4	40	17	671.967
13	5	13	40	23	883.690
14	13	5	40	19	740.642
15	12	13	40	12	447.423
16	13	12	40	12	475.311
17	11	12	40	10	386.568
18	12	11	40	9	360
19	8	11	40	22	872.963
20	11	8	40	16	604.747
21	8	9	40	13	520
22	9	8	40	18	695.461
23	8	10	40	15	600
24	10	8	40	16	623.026
25	10	9	40	2	80
26	9	10	40	3	120
27	8	7	40	36	1422.498
28	7	8	40	40	1600
29	7	5	40	40	1600
30	5	7	40	40	1600

الجدول (11): أهم المعاملات الناتجة في حالات النقل المختلفة.

نقل إنترنت منخفض	نقل إنترنت كثيف	نقل شبكة منخفض	نقل شبكة كثيف	
30	81	51	218	عدد المسارات الناتجة
2.86	7.63	4.76	19.53	متوسط عدد الأطوال الموجية المستخدمة في كل ليف
[4 5]	[4 5] [3 4] [5 7]	[5 7]	[4 5] [5 6] [5 7] [7 8]	الوصلات الأكثر حملاً للنقل
[9 10] [11 12]	[9 10] [11 12]	[9 10]	[9 10]	الوصلات الأقل حملاً للنقل

يتضح من الجدول السابق أنه كلما زاد الحمل في الشبكة كلما كان هناك حاجة لزيادة عدد الأطوال الموجية في الشبكة ولكن بالمقابل هناك عدد من الوصلات تمر بها المعطيات بشكل كثيف مما يؤدي إلى حدوث اختناقات في الشبكة كما هو الحال في الوصلات [4 5] و [5 7] والتي تمتلك أكبر كمية معطيات منقولة في الشبكة وأكبر عدد من الأطوال الموجية المستخدمة في حين أن بعض الوصلات مثل [9 10] و [11 12] لا تحتوي على أي نقل في حالة استخدام الشبكة لنقل الإنترنت وفي أحسن حالاتها فإنها تقوم بنقل 120 Gbps كحد أعظمي للوصلة [9 10] و 386 Gbps للوصلة [11 12] وذلك من أجل حالة نقل شبكة كثيف وباعتبار هذه النتائج فإنه بالإمكان إجراء تعديل على بنية الشبكة السورية للاتصالات من أجل حل مشكلة الاختناق الناتجة بشكل أساسي في الوصلتين [4 5] والوصلة [7 8]. وهذا ممكن طبعاً بزيادة عدد الأطوال الموجية المستخدمة في الوصلة التي يحدث بها اختناق ويمكن أيضاً بإضافة ألياف ضوئية أو إزالتها من الشبكة وذلك بغية الحصول على أفضل أداء للشبكة بالإضافة إلى توزيع حمل منتظم بين الوصلات وبالتالي الحصول على أقل عدد ممكن من الأطوال الموجية المستخدمة في الشبكة.

نقوم فيما يلي باقتراح عدّة تعديلات على الشبكة ودراسة التوجيه في البنى المقترحة لمعرفة البنية ذات الأداء الأمثل. يبين الشكل (4) عدّة بنى مقترحة للشبكة حيث نقترح بالبداية (القسم أ من الشكل 4) حذف الوصلات بين DARAA و SWIDA بالإضافة إلى DAA2 و DAW1 وهما الوصلتان اللتان تمتلكان أقل كمية نقل معطيات. ولتخفيف الضغط على الوصلات [7 8] و [5 7] نضيف ليف ضوئي يصل بين العقدة (DAA2) 11 والعقدة (HOMS) 5 ووصلة ثانية تصل بين العقدين (HAMA) 6 و (LATAKIA) 3 وذلك يخفف الحمل عن الوصلة [3 4] ولكنه بالمقابل يضيف حمل إضافي بسيط على الوصلة [5 6]. والبنية الثانية (القسم ب من الشكل 4) يختلف عن البنية السابقة بعدم إزالة أي ليف ضوئي من الشبكة. والبنية الثالثة (القسم ج من الشكل 4) نضيف الوصلة [6 4] عوضاً عن المقترح [6 3] مع حذف الوصلات [9 10] و [11 12] والبنية الرابعة نفس البنية الثالثة لكن بدون حذف للوصلات.



الشكل (4): البنى المقترحة للشبكة السورية الضوئية للاتصالات.

نأخذ من أجل المقارنة بين هذه البنى الحالة الأشد حرجاً للشبكة وهي حالة نقل شبكة كثيف. وباستخدام صيغة ILP لبناء بنية وهمية للشبكة تنتج الجداول من (12) وحتى (15) والتي تبين الأطوال الموجية المستخدمة من أجل حالة نقل شبكة كثيف من أجل البنى الأربع المقترحة بالترتيب، ويبين الجدول (16) والذي يبين الفرق في المعاملات الناتجة من أجل كل نتيجة محاكاة حيث نجد أنه من أجل البنية الأولى للشبكة السورية فإن عدد المسارات الضوئية الناتجة هو 220 ومتوسط عدد الأطوال الموجية المستخدمة في كل وصلة هو 19.96 وهي نتيجة سيئة بالمقارنة مع بنية الشبكة الأساسية والتي أعطت متوسط عدد أطوال موجية 19.53 أما من أجل البنية الثانية فحصلنا على عدد مسارات ضوئية 232 مسار ضوئي بمتوسط عدد أطوال موجية في الوصلة الواحدة 18 وهي نتيجة أفضل من البنية الأساسية والبنية الأولى. أما البنية

الأفضل فهي البنية الرابعة والتي حصلنا فيها على 232 مسار ضوئي أيضاً بمتوسط عدد أطوال موجية 16.73 وهذه النتيجة تعد الأفضل بين جميع البنى الناتجة.

الجدول (12): الأطوال الموجية المستخدمة من أجل حالة نقل شبكة كثيف لمقترح الشبكة الأول.

رقم الوصلة	العقدة المصدر	العقدة الوجهة	الأطوال المتاحة	الأطوال الموجية المستخدمة	الحمل المنقول عبر الوصلة Gbps
1	1	2	40	17	616.679
2	2	1	40	7	240.037
3	1	6	40	18	680.037
4	6	1	40	25	929.692
5	2	3	40	16	589.106
6	3	2	40	5	200
7	3	4	40	27	976.598
8	4	3	40	14	532.020
9	6	5	40	27	1053.065
10	5	6	40	35	1327.794
11	4	5	40	37	1390.496
12	5	4	40	18	711.382
13	5	13	40	31	1215.114
14	13	5	40	27	1020.646
15	12	13	40	16	617.894
16	13	12	40	18	720
17	8	11	40	5	189.445
18	11	8	40	2	80
19	8	9	40	17	675.120
20	9	8	40	20	774.425
21	8	10	40	18	717.850
22	10	8	40	17	658.282
23	8	7	40	32	1254.425
24	7	8	40	37	1465.197
25	7	5	40	40	1600
26	5	7	40	40	1600
27	11	5	40	10	400
28	5	11	40	17	625
29	6	3	40	3	81.686
30	3	6	40	3	100.638

الجدول (13): الأطوال الموجية المستخدمة من أجل حالة نقل شبكة كثيف لمقترح الشبكة الثاني.

رقم الوصلة	العقدة المصدر	العقدة الوجهة	الأطوال الموجية المتاحة	الأطوال الموجية المستخدمة	الحمل المنقول عبر الوصلة Gbps
1	1	2	40	18	673.982
2	2	1	40	5	200
3	1	6	40	17	680
4	6	1	40	27	1048.799
5	2	3	40	18	720
6	3	2	40	5	200
7	3	4	40	29	1129.100
8	4	3	40	14	560
9	6	5	40	27	1057.143
10	5	6	40	37	1460.243
11	4	5	40	39	1546.254
12	5	4	40	19	760
13	5	13	40	18	660.382
14	13	5	40	12	480
15	12	13	40	0	0
16	13	12	40	2	80
17	11	12	40	17	650.222
18	12	11	40	18	675.766
19	8	11	40	11	392.210
20	11	8	40	9	304.821
21	8	9	40	17	662.419
22	9	8	40	19	756.691
23	8	10	40	17	644.990
24	10	8	40	17	623.063
25	10	9	40	2	80
26	9	10	40	3	120
27	8	7	40	32	1237.766
28	7	8	40	35	1400
29	7	5	40	40	1600
30	5	7	40	40	1600
31	11	5	40	19	718.910
32	5	11	40	23	920
33	6	3	40	3	89.100
34	3	6	40	3	120

الجدول (14): الأطوال الموجية المستخدمة من أجل حالة نقل شبكة كثيف لمقترح الشبكة الثالث.

رقم الوصلة	العقدة المصدر	العقدة الوجهة	الأطوال الموجية المتاحة	الأطوال الموجية المستخدمة	الحمل المنقول عبر الوصلة Gbps
1	1	2	40	5	168.959
2	2	1	40	7	240.037
3	1	6	40	18	680.037
4	6	1	40	13	481.972
5	2	3	40	16	589.106
6	3	2	40	17	647.720
7	3	4	40	3	120
8	4	3	40	3	120
9	6	5	40	30	1134.751
10	5	6	40	26	980.712
11	4	5	40	16	596.222
12	5	4	40	10	361.686
13	5	13	40	31	1215.114
14	13	5	40	27	1020.646
15	12	13	40	16	617.894
16	13	12	40	18	720
17	8	11	40	5	189.445
18	11	8	40	2	80
19	8	9	40	17	675.120
20	9	8	40	20	774.425
21	8	10	40	18	717.850
22	10	8	40	17	658.282
23	8	7	40	32	1254.425
24	7	8	40	37	1465.197
25	7	5	40	40	1600
26	5	7	40	40	1600
27	5	3	40	23	879.102
28	3	5	40	24	894.912
29	5	11	40	17	625.929
30	11	5	40	10	400

الجدول (15): الأطوال الموجية المستخدمة من أجل حالة نقل شبكة كثيف لمقترح الشبكة الرابع.

رقم الوصلة	العقدة المصدر	العقدة الوجهة	الأطوال الموجية المتاحة	الأطوال الموجية المستخدمة	الحمل المنقول عبر الوصلة Gbps
1	1	2	40	6	209.410
2	2	1	40	5	200

680	17	40	6	1	3
584.227	15	40	1	6	4
720	18	40	3	2	5
664.572	17	40	2	3	6
120	3	40	4	3	7
120	3	40	3	4	8
1146.243	30	40	5	6	9
1115.671	28	40	6	5	10
626.254	16	40	5	4	11
409.100	11	40	4	5	12
660.382	18	40	13	5	13
480	12	40	5	13	14
0	0	40	13	12	15
80	2	40	12	13	16
650.222	17	40	12	11	17
675.766	18	40	11	12	18
392.210	11	40	11	8	19
304.821	9	40	8	11	20
662.419	17	40	9	8	21
756.691	19	40	8	9	22
644.990	17	40	10	8	23
623.063	17	40	8	10	24
80	2	40	9	10	25
120	3	40	10	9	26
1237.766	32	40	7	8	27
1400	35	40	8	7	28
1600	40	40	5	7	29
1600	40	40	7	5	30
904.572	23	40	3	5	31
1040	26	40	5	3	32
920	23	40	11	5	33
718.910	19	40	5	11	34

الجدول (16): أهم المعاملات الناتجة من أجل البنى المقترحة.

البنية الأولى	البنية الثانية	البنية الثالثة	البنية الرابعة	
220	232	220	232	عدد المسارات الناتجة
19.97	18	18.6	16.73	متوسط عدد الأطوال الموجية المستخدمة في كل ليف

وبإعادة محاكاة حالات النقل المختلفة من أجل بنية الشبكة الرابعة نجد أنّ متوسط عدد الأطوال الموجية الناتجة من أجل جميع حالات النقل أفضل من البنية الأساسية للشبكة وبالتالي يمكن القول بأن البنية الرابعة للشبكة هي الأفضل من بين البنى المقترحة كما هو واضح في الجدول (17).

الجدول (17): أهم المعاملات الناتجة في حالات النقل المختلفة في البنية المقترحة الرابعة.

نقل إنترنت منخفض	نقل إنترنت كثيف	نقل شبكة كثيف	نقل إنترنت منخفض	نقل شبكة منخفض	نقل شبكة كثيف
عدد المسارات الناتجة	30	81	51	232	
متوسط عدد الأطوال الموجية المستخدمة في كل ليف	2.12	5.5	3.65	16.73	

الاستنتاجات والتوصيات:

احتوت هذه المقالة على دراسة أداء ILP على شبكة الاتصالات الضوئية السورية واستخدما ILP لبناء بنية وهمية للشبكة وذلك تبعاً لمعرفة مصفوفة النقل في الشبكة. أجرينا هذه الدراسة من أجل عدة حالات لنقل الشبكة وهي: نقل إنترنت منخفض، نقل إنترنت كثيف، نقل شبكة منخفض، ونقل شبكة كثيف ووجدنا من خلال المحاكاة مايلي:

- يزداد متوسط عدد الأطوال الموجية المستخدمة في وصلات الشبكة بزيادة كمية النقل في الشبكة حيث بلغ 2.86 طول موجي في الليف الضوئي الواحد من أجل حالة نقل الإنترنت المنخفض و 7.63 من أجل حالة نقل الإنترنت الكثيف و 4.76 من أجل حالة نقل شبكة منخفض و 19.53 من أجل نقل شبكة كثيف.

- هناك حاجة لزيادة عدد الأطوال الموجية في الشبكة كلما زاد الحمل فيها ولكن بالمقابل هناك عدد من الوصلات تمر بها المعطيات بشكل كثيف مما يؤدي إلى حدوث اختناقات في الشبكة، حيث تراوح عدد المسارات الناتجة في الحالات السابقة من 30 مسار إلى 218 مسار ضوئي عبر الشبكة.

- وجدنا من خلال عرض البنية الوهمية للشبكة أنّ بعض الوصلات (الألياف الضوئية) في الشبكة تعاني من حدوث اختناقات كبيرة واستخدام أعداد موجية كبيرة لتخديم الشبكة والحصول على أقل احتمال انقطاع ممكن بينما هناك وصلات أخرى تقوم باستخدام أطوال موجية بالحد الأدنى في الشبكة.

وبناءً على البنود السابقة، لاحظنا الإمكانية التي تتيحها ILP في تحليل الشبكة والقدرة على قراءة منهجية عمل الشبكة وبالتالي العمل على تحسينها وقمنا بالاستفادة من هذه النتائج في تحسين بنية الشبكة الضوئية للاتصالات السورية والحصول على أداء أمثل لها ومن أجل ذلك أجرينا العديد من التغييرات على البنية الأساسية للشبكة وقمنا بدراسة أثر هذا التغيير على سلوك توجيه الشبكة باستخدام ILP ووجدنا مايلي:

- البنية الرابعة من البنى المقترحة كانت الأفضل وأعطت 2.12 طول موجي في الليف الضوئي الواحد من أجل حالة نقل الإنترنت المنخفض و 5.5 من أجل حالة نقل الإنترنت الكثيف و 3.65 من أجل حالة نقل شبكة منخفض و 16.73 من أجل نقل شبكة كثيف. وهي نتائج أفضل بكثير مما كانت عليه بنية الشبكة الأساسية
- توزع استخدام الأطوال الموجية في الشبكة أصبح أكثر توازناً وفق البنية المقترحة.

ويمكن فيما يلي من الدراسات والأبحاث أن نخوض في دراسة الأنواع المختلفة لتوابع الهدف المستخدمة في صيغة ILP والقيود المشروطة عليها وذلك من أجل الوصول إلى إمكانية تحسين الشبكة وفق القيد المطلوب من مصمم الشبكة. فنحن في دراستنا استخدمنا ILP لتخفيض احتمال الحجب في الشبكة إلى أقل ما يمكن. وبالتالي يمكن دراسة معادلات ILP والتي تعطي حلولاً NP-hard لإيجاد الحل الأمثل من أجل الحصول على أقل اختناق في وصلة معينة، أقل عدد أطوال موجية ممكنة سواءً في وصلة معينة أو في الشبكة ككل.

المراجع

- [1] Seema Ansari; Adeel Ansari, Comparative Analysis of Routing and Wavelength Assignment Algorithms used in WDM Optical Networks, Research Journal of Applied Sciences, Engineering and Technology 7(13): 2646-2654, 2014.
- [2] A. Sangeetha; K.Anusudha; Shobhit Mathur; Manoj Kumar Chaluvadi, Wavelength Assignment Problem in Optical WDM Networks, International Journal of Recent Trends in Engineering, Vol 1, No. 3, May 2009.
- [3] D. Banerjee; B. Mukherjee, A Practical Approach for Routing and Wavelength Assignment in Large Wavelength-Routed Optical Networks, IEEE Journal Selected Areas in Communications, vol. 14, no. 5, pp. 903–908, June 1996.
- [4] Ramaswami, R.; Sivarajan, Routing and wavelength assignment in all-optical networks. IEEE/ACM Trans. Networking3(5), 489–500. 1995.
- [5] Bijoy Chand Chatterjee; Nityananda Sarma; Partha Pratim Sahu; Eiji Oki; Routing and Wavelength Assignment for WDM-based Optical Networks – Quality of Service and Fault Resilience, Springer International Publishing AG 2017.
- [6] H. Zang; J. P. Jue; and B. Mukherjee, A review of routing and wavelength assignment approaches for wavelength-routed optical WDM networks, Optical Networks Magazine, pages 47–60, January 2000.
- [7] R. Krishnaswamy; K. Sivarajan, Algorithms for routing and wavelength assignment based on solutions of LP-relaxation. IEEE Communications Letters· 437–435:(10)5October 2001.
- [8] M. Kumar; P. Kumar, Static lightpath establishment in WDM networks - new ILP formulations and heuristic algorithms. Computer Communications, 2002.
- [9] K. Lee; K. Kang; T. Lee; S. Park, An optimization approach to routing and wavelength assignment in WDM all-optical mesh networks without wavelength conversion. ETRI Journal, 24(2):131–141, April 2002
- [10] L. Margara; J. Simon, Wavelength assignment problem on all-optical networks with k fibres per link. In Automata, Languages and Programming. 27th International Colloquium, ICALP 2000, volume 1853 of Lectures Notes in Computer Science, pages 768–779, 2000.
- [11] Siva; R.M.C.; Mohan, G, WDM Optical Networks: Concepts, Design and Algorithms. Prentice Hall PTR, Upper Saddle River, NJ. 2003.
- [12] Wan, X.; Hua, N.; Zheng; Dynamic routing and spectrum assignment in spectrum-flexible transparent optical networks. IEEE/OSA J. Opt. Commun. Network.4(8), 603–613. 2012.
- [13] B. Jaumard; C. Meyer; B. Thiongane, Comparison of ILP formulations for the RWA problem, Optical Switching and Networking 4 2007.