

# Design of a Ring National Science Foundation Network (NSFNET) based on Single-Pass and Double-Pass Wavelength Selective Switching (WSS)

Dr. Haitham AIRADWAN\*

Dr. Hadeel ESSA\*\*

Asala KHADDOUR\*\*\*

(Received 20 / 12 / 2022. Accepted 20 / 3 / 2023)

## □ ABSTRACT □

Flexible optical networks constitute the fifth generation of optical networks, and interest has increased due to its high flexibility and wide spectrum efficiency. It allowed the spectrum to be divided into a group of frequency slots with a bandwidth of 12.5 GHz, and thus we obtained variable bandwidth and fast access with great efficiency.

Flexible optical networks meet the increasing traffic requirements. The main challenge is to determine the resilience of the performance of the individual components and subsystems required to support the networks, so that the design and placement of network elements within the network affects resilience and performance at the network level. In this research, we will be interested in comparing flexibility and selectivity between the single-pass and double-pass of the optical signal within the wavelength selective switch (WSS) based on micro electro mechanical mirrors (MEMS).

Finally, we will show the difference between the single and double pass within the switch through a simulation of a ring NSFNET network consisting of 14 nodes based on the switch (WSS) in its infrastructure. So that we studied the performance of the optical paths between the optical nodes that make up the network, the delay time for each optical path, and then measured the input power, the output power, the signal-to-noise ratio, the color dispersion as well as the polarization pattern dispersion at the input and output of each node, and within the optical fibers that connect between the network nodes.

**Keywords:** Elastic optical networks (EON), wavelength selective switching(WSS), micro electro mechanical mirror system (MEMS), switching flexibility, actual traffic, signal-to-noise ratio, polarization mode dispersion(PMD), chromatic dispersion(CD).

Copyright



:Tishreen University journal-Syria, The authors retain the copyright under a CC BY-NC-SA 04

\* Professor, Department of Communication and Electronics, Faculty of mechanical and electrical engineering, Tishreen University, Latakia, Syria. E-mail: [dr.haisamhosinalrodwan@tishreen.edu.sy](mailto:dr.haisamhosinalrodwan@tishreen.edu.sy)

\*\* Assistant Professor, Department of Computer and Automatic Control Engineering, Faculty of mechanical and electrical engineering, Tishreen University, Latakia, Syria. E-mail: [hadeelaliissa@tishreen.edu.sy](mailto:hadeelaliissa@tishreen.edu.sy)

\*\*\* Ph.D. student, Department of Communication and Electronics, Faculty of mechanical and electrical engineering, Tishreen University, Latakia, Syria E-mail: [asala.khaddoor1990@gmail.com](mailto:asala.khaddoor1990@gmail.com)

## تصميم شبكة مؤسسة العلوم الوطنية (NSFNET) الحلقية بالاعتماد على المبدل الانتقائي لطول الموجة WSS ذي التمرير الواحد والتمرير المزدوج للإشارة

د. هيثم الرضوان\*

د. هديل عيسى\*\*

أصالة خضور\*\*\*

تاريخ الإيداع 20 / 12 / 2022. قُبِلَ للنشر في 20 / 3 / 2023

### □ ملخص □

تشكل الشبكات الضوئية المرنة الجيل الخامس من الشبكات الضوئية، وازداد الاهتمام بها لما تمتاز به من مرونة عالية وفعالية طيف واسع؛ حيث سمحت بتقسيم الطيف إلى مجموعة من الحيزات الترددية (frequency slots) بعرض حزمة ترددي 12.5 GHz ، وبالتالي تم الحصول على عرض حزمة متغير ووصول سريع بفعالية كبيرة. توفر الشبكات البصرية المرنة متطلبات حركة المرور المتزايدة. ويتمثل التحدي الرئيسي في تحديد المرونة بأداء المكونات الفردية والأنظمة الفرعية اللازمة لدعم الشبكات، بحيث يؤثر تصميم عناصر الشبكة ووضعها داخل الشبكة على المرونة والأداء على مستوى الشبكة. في بحثنا هذا سنهتم بمقارنة المرونة والانتقائية بين المرور الوحيد والمرور المضاعف للإشارة الضوئية ضمن المبدل الانتقائي لطول الموجة (WSS) wavelength selective switching المعتمد على المرايا الكهروميكانيكية الميكروية (MEMS) micro electro mechanical mirror system. أخيراً سنعرض الفرق بين المرورين الوحيد والمضاعف ضمن المبدل من خلال محاكاة لشبكة مؤسسة العلوم الوطنية (National Science Foundation Network (NSFNET) الحلقية المكونة من 14 عقدة التي تعتمد في بنيتها الأساسية على المبدل (WSS). بحيث ناقشنا أداء المسارات الضوئية بين العقد الضوئية المكونة للشبكة، وقمنا بحساب الحركية الفعلية للشبكة، وزمن التأخير لكل مسار ضوئي، وثم قياس استطاعة الدخل واستطاعة الخرج، ونسبة الإشارة إلى الضجيج، والتشتت اللوني وكذلك تشتت نمط الاستقطاب عند دخل وخرج كل عقدة، ودخل الألياف الضوئية التي تصل بين عقد الشبكة.

**الكلمات المفتاحية:** الشبكات الضوئية المرنة، المبدل الانتقائي لطول الموجة، نظام المرايا الكهروميكانيكية الميكروية، مرونة التبديل، الحركية الفعلية للشبكة، نسبة الإشارة إلى الضجيج، تشتت نمط الاستقطاب، التشتت اللوني.

حقوق النشر : مجلة جامعة تشرين- سورية، يحتفظ المؤلفون بحقوق النشر بموجب الترخيص



CC BY-NC-SA 04

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

البريد الإلكتروني: [dr.haisamhosinalrodwan@tishreen.edu.sy](mailto:dr.haisamhosinalrodwan@tishreen.edu.sy)

\*\* مدرس، قسم هندسة الاتصالات والالكترونيات ، كلية الهندسة الميكانيكية والكهربائية، جامعة تشرين، اللاذقية، سورية.

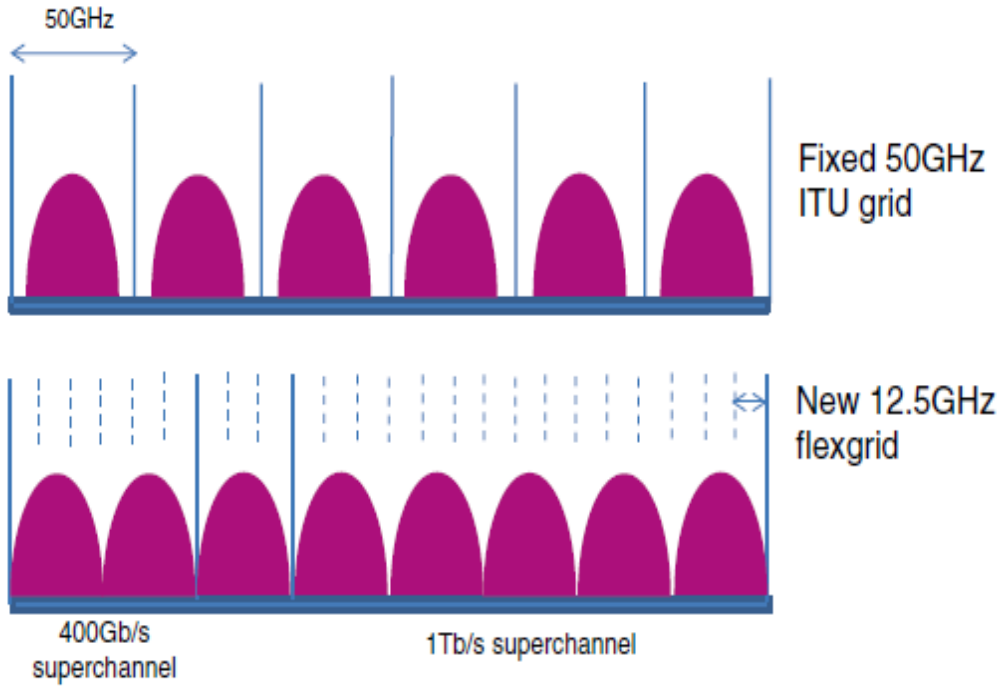
البريد الإلكتروني: [dr.hadeelaliissa@tishreen.edu.sy](mailto:dr.hadeelaliissa@tishreen.edu.sy)

\*\*\* طالبة (دكتوراه)، قسم هندسة الاتصالات والالكترونيات، كلية الهندسة الميكانيكية والكهربائية، جامعة تشرين، اللاذقية سورية.

البريد الإلكتروني: [asala.khadoor1990@gmail.com](mailto:asala.khadoor1990@gmail.com)

## مقدمة:

تمثل الشبكات الضوئية الجوهر الأساسي لتكنولوجيا الاتصالات في الشبكة العنكبوتية العالمية، تطورت هذه الشبكات بشكل سريع نتيجة النمو الهائل لحركة البيانات بسبب خدمات الوسائط المتعددة وزيادة مصادر هذه البيانات. أصبح أداء تقنية الإرسال الضوئي التقليدية غير كافٍ لتلبية احتياجات الحركة المتزايدة بسبب محدودية عرض الحزمة. لذلك أصبح من الضروري وجود شبكة معيارية جديدة تتيح كفاءة طيفية مرنة لتواكب التنوع في المتطلبات. لذلك اقترح قطاع تقييس الاتصالات International Telecommunication Union -Telecommunication Standardization Sector (ITU-T) شبكة أدق تعتمد على حيز ترددي متغير تسمى هذه الشبكة بشبكة التردد المرنة أو الشبكة المرنة. تسمح الشبكة المرنة بتخصيص عدد متغير (n) من الحيزات الترددية ذات الحجم الثابت لقناة ضوئية. يبلغ قياس الحيز الترددي 12.5GHz (مما سمح بنقل 100Gpbs في 37.5GHz وبالتالي استخدام 3 حيزات ترددية بدلاً من 50GHz في الشبكة الثابتة). وبالتالي أصبحت هذه الشبكات قادرة على دعم معدلات إرسال تصل حتى 1Tb / s، حققت زيادة في فعالية الطيف الضوئي المستخدم ويبين الشكل (1) أن قيمة معدل إرسال الشبكات الثابتة (200Gbps) ويصل معدل إرسال الشبكات المرنة إلى (1Tbps) كما يبين آلية تخصيص الطيف للشبكتين [1-4].



الشكل (1): معدل إرسال الشبكات الثابتة ومعدل إرسال الشبكات المرنة

اهتم مشغلو الشبكات بدراسة وتحليل العلاقات الرياضية والفيزيائية بين بارامترات الشبكة الضوئية، والتي تتضمن السعة والمرونة والكفاءة الطيفية والتكلفة ووصول مسار الضوء والخسارة والاتصال، وذلك من أجل الحصول على شبكة فعالة من حيث التكلفة وتقليل تعقيد تصميم مكونات الشبكة.

## أهمية البحث وأهدافه:

تناول هذا البحث مقارنة معيار المرونة لمبدل WSS المعتمد على مرايا MEMS، وهو مكون فيزيائي هام في الشبكات الضوئية المرنة (EON) Elastic Optical Networks، وذلك بالاعتماد على متطلبات المرونة والأداء. اعتمدت الدراسة على تحديد متطلبات المرونة من خلال عدد منافذ الدخل وعدد منافذ الخرج وعدد القنوات التي يمكن إرسالها. سنبين في هذا البحث أداء ومرونة المبدل عند المرور الوحيد والمرور المضاعف للإشارة الضوئية ضمنه، وذلك بالاعتماد على تحسين انتقائية المبدل والتي بدورها تزيد من عدد القنوات التي يمكن إرسالها. سنقدم في هذا البحث محاكاة لشبكة NSFNET الحلقية المكونة من 14 عقدة تعتمد في بنيتها الأساسية على المبدل (WSS)، وذلك عند المرور الوحيد وكذلك عند المرور المضاعف للإشارة الضوئية ضمن المبدل. سنعرض في هذا البحث أداء المسارات الضوئية بين العقد الضوئية المكونة للشبكة والحركية الفعلية للشبكة؛ حيث سندرس زمن التأخير لكل مسار ضوئي، واستطاعة الدخل والخرج ونسبة الإشارة إلى الضجيج والتشتت اللوني وتشتت نمط الاستقطاب عند دخل وخرج كل عقدة، وسندرس استطاعة الدخل والخرج والتشتت اللوني للألياف الضوئية التي تصل بين عقد الشبكة.

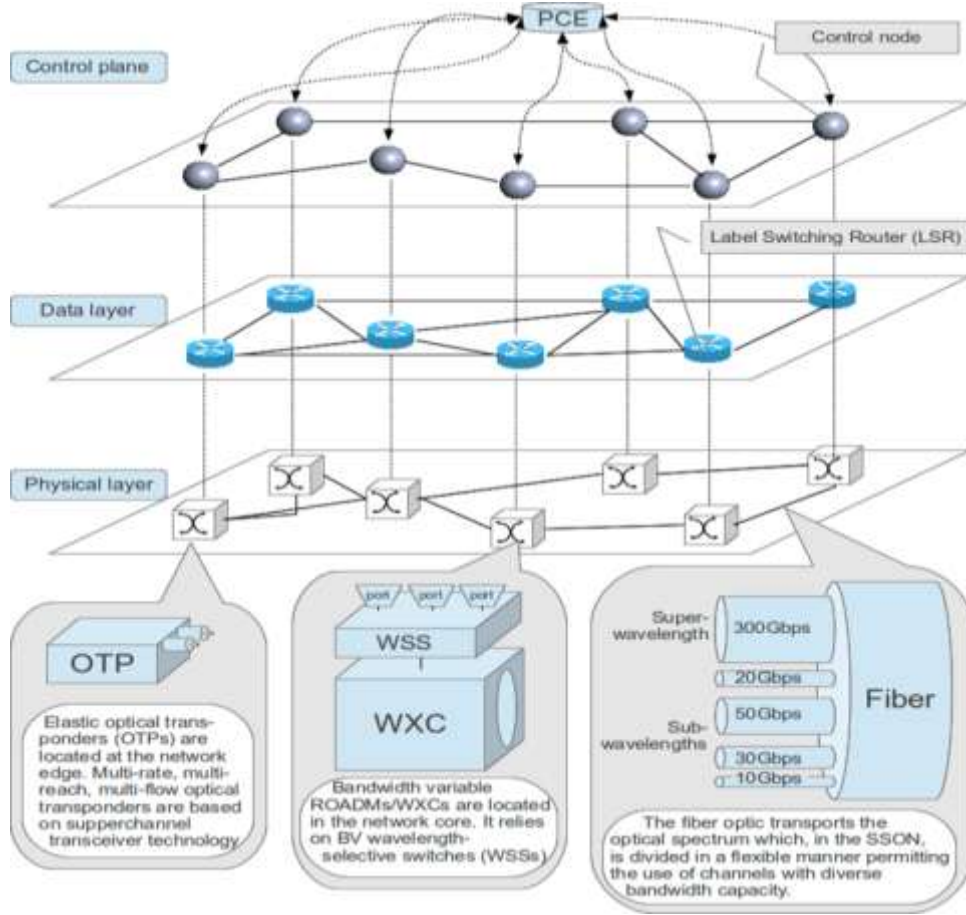
## طرائق البحث ومواده:

### 1- مكونات الشبكة الضوئية المرنة:

تتكون الشبكة الضوئية المرنة من ثلاث مستويات:

#### 1-1 مستوى التحكم control plane:

يؤمن مسار التحكم في الشبكات الضوئية المرنة مسار تلقائي من طرف إلى طرف end to end. هناك عدة متطلبات لتحديد عمل مستوى التحكم وهي التوجيه وتخصيص الطيف، واختيار صيغة التعديل المناسبة لطول المسار، وقابلية التكيف مع تغير الزمن، وتنفيذ استراتيجيات الاستمرارية، وضمان جودة الخدمة. يوضح الشكل (2) مكونات الشبكة الضوئية المرنة [5].



الشكل (2): مكونات الشبكة الضوئية المرنة

## 2-1 طبقة البيانات Data layer:

تتكون من مجموعة موجهات تقوم بعملية التبدل فيما بينها، ونقل إشارات التحكم بين مستوى التحكم وأجهزة الطبقة الفيزيائية.

## 3-1 الطبقة الفيزيائية Physical layer:

تتكون الطبقة الفيزيائية من:

### 1-3-1 مرسلات ومستقبلات ضوئية مرنة (OTP): Elastic Optical Trasponder:

تتوضع على حواف الشبكة، وتعتمد على تقنية إرسال واستقبال القناة الفائقة supper channel، وتعرف القناة الفائقة بأنها مجموعة من القنوات الفرعية sub channel التي تصطف مع بعضها بعض لتحقيق كفاءة نقل عالية في الشبكة كما تعتمد سعتها على عدد القنوات الموجودة وسعة كل منها [5].

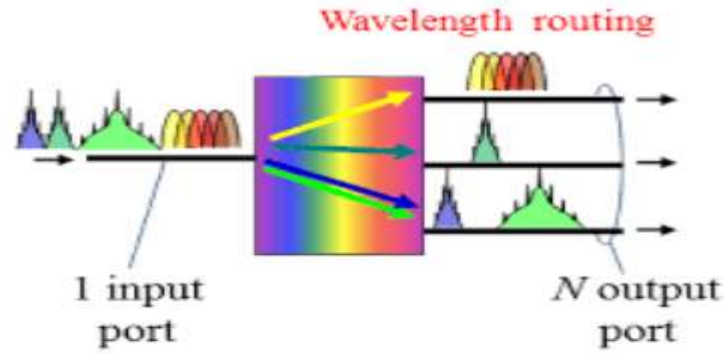
### 2-3-1 العقد الضوئية المتوضعة في قلب الشبكة: تتألف من:

### 1-2-3-1 مجمع إضافة وحذف ضوئي قابل لإعادة التكوين ROADM Reconfigurable Optical Add

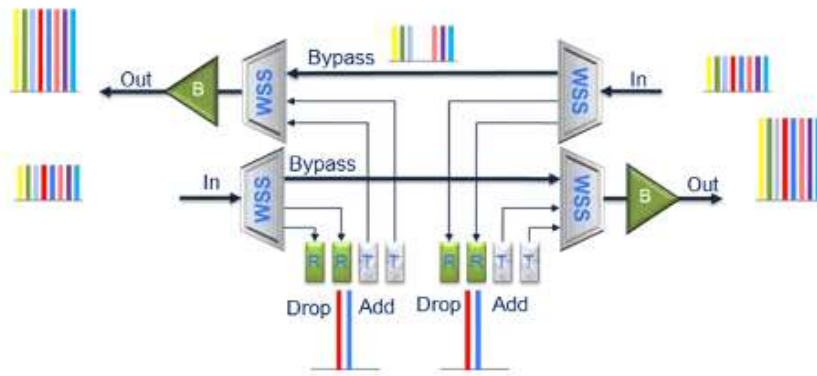
#### :Drop Multiplexer

يتم التحكم في حركة إشارات بواسطة عدة عقد ROADM في شبكة الاتصالات الضوئية. يتم إضافة أو حذف بعض أطوال الموجة من مركز البيانات، وتبديل البعض الآخر من الدخول إلى الخرج بين عقد الشبكة لاستغلال كامل عرض

الحزمة، ويعتمد في بنيته الأساسية على مبدل انتقائي لطول الموجة Wavelength Selective Switching (WSS)، ويبين الشكل (3) مبدأ عمل تقنية ROADM المعتمدة على مبدلات WSS [6].



(a): مبدأ عمل WSS

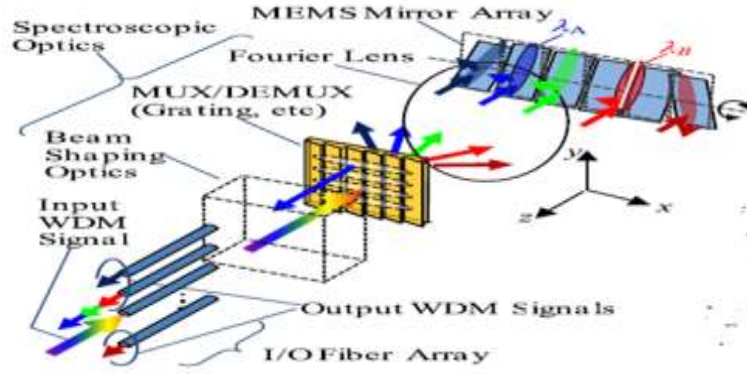


(b) تصميم ROADM

الشكل (3): (a) مبدأ عمل WSS ، (b) تصميم ROADM

### 1-3-2-2 المبدل الانتقائي لطول الموجة WSS:

هي مكونات مستخدمة في الشبكات الضوئية لتوجيه الإشارات بين الألياف الضوئية وفقاً لطول الموجة. يشكل المبدل الانتقائي لطول الموجة WSS البنية الأساسية ل ROADM؛ حيث أن التكنولوجيا الرئيسية التي تدعم الشبكات المرنة هي تقنية تبديل طول الموجة الانتقائي؛ حيث يحوي مبدل WSS على مصفوفة ضوئية لها دخل متعدد وخرج متعدد لذلك يتم استخدام شبكة إرسال والتي تكون قادرة على تعدد الإرسال وإزالة تعدد الإرسال في نفس الوقت في منفذ واحد. يفصل مبدل ال WSS الضوء الوارد إلى مجموعة من الأطوال الموجية، ويقوم بانتقاء طول الموجة المرغوب عن طريق حرقه عن المسار الضوئي الأصلي ومن ثم إضافته إلى منفذ آخر من مصفوفة الألياف الضوئية، يبين الشكل (4) مكونات مبدل WSS [7-8].

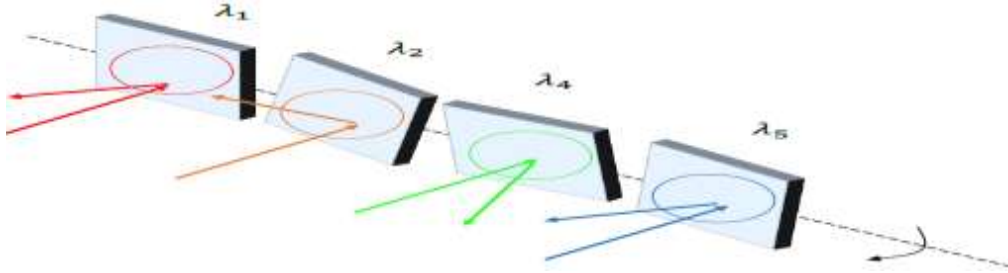


الشكل (4): مكونات مبدل WSS

### 1-2-2-3-1 المبدل المستخدم في تقنية WSS:

المرايا الالكتروميكانيكية المصغرة (MEMS) Micro-Electro Mechanical System:

رسخت مبدلات (MEMS) نفسها بشكل سريع باعتبارها التكنولوجيا الأكثر جاذبية للتبديل الضوئي حيث أنها تسمح بحلول تبديل ضوئية مع عدد كبير من المنافذ ذات الخسارة المنخفضة والتكلفة القليلة والخسارة المنخفضة واستهلاك الطاقة المنخفض التداخل المنخفض والحجم الصغير وقابلية التوسع وسرعة كافية تتراوح من ملي ثانية إلى عدة مئات من الميكروثانية. يعتمد مبدل MEMS على مجموعة من المرايا الميكروية التي تتحرك عند تحفيزها بواسطة إشارة كهربائية، ويوضح الشكل (5) مواضع المرايا المختلفة التي تؤدي إلى اتجاهات تبديل مختلفة. يتم تركيز كل حزمة إلى مرآة ميكروية واحدة تدور بزوايا معينة مما يؤدي إلى تغيير المسار الضوئي حسب موقع منفذ الخرج المطلوب [7].



الشكل (5): مبدأ تشغيل مرايا MEMS

### 1-3-3-3 الألياف الضوئية المستخدمة لأغراض الشبكات الضوئية المرنة:

تصل الألياف الضوئية بين العقد الموجودة ضمن الشبكة والعقد الموجودة على حافة الشبكة؛ حيث يتم تقسيم سعة الليف المرن إلى مجموعة ساعات متغيرة حسب الطلب، وتتميز الألياف المرنة بالخصائص الآتية:  
القناة الفرعية (sub-wavelength): حيث يتم تقطيع سعة القناة الثابتة (Segmentation) إلى مجموعة من الساعات المتغيرة والتي تخدم عدة مستخدمين بدلاً من مستخدم واحد.  
القناة الفائقة (Super-wavelength): حيث يتم تجميع عدة قنوات (Aggregation) لتخدم مستخدم واحد حسب الطلب [9].

## النتائج والمناقشة:

1-2 دراسة مرونة المبدل (WSS) في حالتي المرور الأول والمرور الثاني للإشارة الضوئية ضمن المبدل: تعبر المرونة عن قدرة النظام على التكيف مع التغيير، وذلك بناءً على وظائف وخصائص تصميم عناصر الشبكة. ويقصد بها التكيف مع تعديل البنية وتغيير التوجيه وهذا ما يدعى بمرونة التبديل [10-12].

يشكل المبدل الانتقائي لطول الموجة (WSS) تقنية أساسية ضمن بنية الشبكة الضوئية المرنة EON، بحيث يقوم بوظيفتي التبديل والتوجيه للطول الموجي. يحتوي مبدل WSS على مصفوفة ضوئية بمجموعة مداخل ومجموعة مخارج بحيث تسمح للأطوال الموجية بالمرور ضمن الحزمة C من منفذ الدخل إلى منفذ خرج تقوم بتوجيهها إليه. في هذا العمل قسمنا الدراسة على مرحلتين وهما مرحلة المرور الوحيد ومرحلة المرور المضاعف للإشارة ضمن مبدل WSS، وهنا درسنا مرونة المبدل  $N \times M$  بالاعتماد على عدد منافذ الدخل وعدد منافذ الخرج وذلك بدلالة عدد القنوات التي يمكن إرسالها، وكذلك قمنا بمقارنة مرونة المبدل عند ازدياد عدد منافذ الدخل والخرج عند مرور الإشارة الضوئية مرة واحدة ضمن المبدل. قدمنا نموذج رياضي يعبر عن مرور وحيد للإشارة الضوئية ضمن مبدل بمنفذ دخل وحيد ومجموعة منافذ خرج [13]. ثم استخدمنا عنصر ضوئي سلبي (Gimbal-less Two-Axis MEMS) لتحقيق المرور المزدوج ضمن المبدل WSS. ولتأكيد نتائج النمذجة أوجدنا العلاقة الرياضية التي تعبر عن المرور المزدوج للإشارة الضوئية ضمن مبدل WSS، وكننتيجة لذلك تم الحصول على انتقائية أعلى عند تطبيق التمرير المزدوج ضمن المبدل WSS، وبالتالي ساهم ذلك في زيادة سعة الشبكة وزيادة مرونتها [14].

سنرى في هذا البحث تأثير زيادة الانتقائية على مرونة المبدل وذلك باستخدام محاكي الماتلاب. تعطى مرونة النظام بالعلاقة الآتية [11]:

$$F(S) = \log(M) \text{ where } S = \{s_1 s_2 \dots s_m\} \quad (1)$$

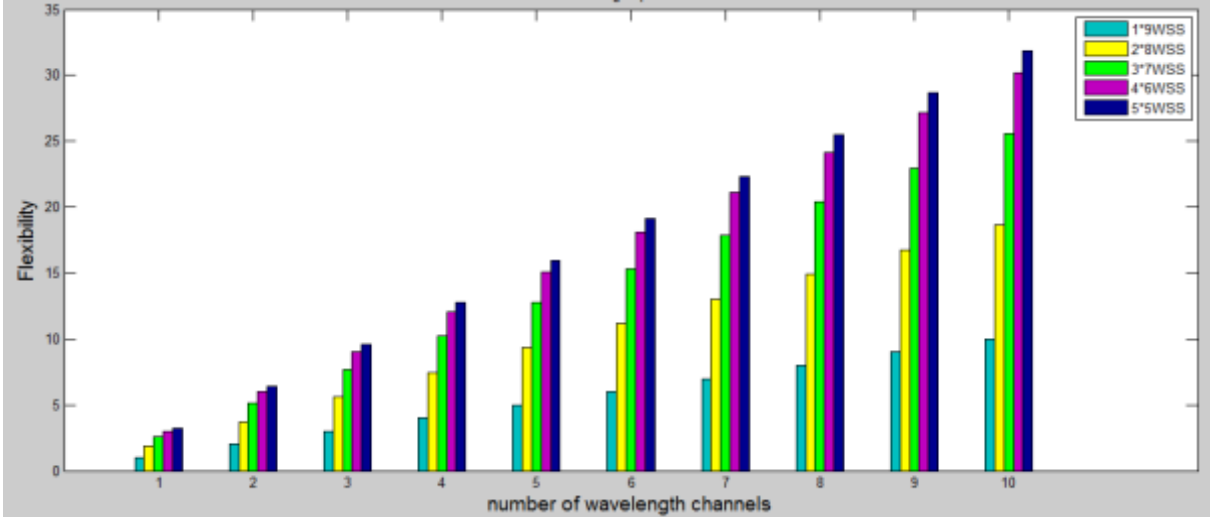
S: المجموعة التي تحتوي على جميع الحالات المحتملة للنظام في أي لحظة.  
M: العدد الإجمالي للحالات المختلفة على افتراض أن جميع الحالات متساوية.  
لقياس مرونة WSS  $N \times M$  نفترض أن عدد قنوات طول الموجة ذات التردد نفسه التي يمكن تمريرها من منافذ الإدخال N إلى منافذ الإخراج M في نفس الوقت هو a، وبالتالي فإن عدد نسخ قناة طول الموجة المحظورة هي (N - a)، و x هي الحد الأقصى لعدد نسخ قناة طول الموجة التي يمكن تمريرها. يمكن حساب مرونة  $N \times M$  WSS باستخدام العلاقة الآتية [11]:

$$F(S) = W \log \left( \sum_{a=0}^x \frac{M!}{(M-a)!} \binom{N}{N-a} \right) \quad (2)$$

if  $N \leq M$ ,  $x = N$  and if  $N > M$ ,  $x = M$

W: عدد قنوات طول الموجة التي يمكن إرسالها.  
نقارن مرونة المبدل  $N \times M$  بالاعتماد على عدد منافذ الدخل وعدد منافذ الخرج، حيث ندرس مبدل يحتوي على 10 منافذ وندرس تبعاً لذلك مرونة كل من المبدلات  $(1 \times 9, 2 \times 8, 3 \times 7, 4 \times 6, 5 \times 5)$  وذلك بدلالة عدد الأطوال الموجية التي يمكن إرسالها. يبين الشكل (6) مرونة المبدلات  $(1 \times 9, 2 \times 8, 3 \times 7, 4 \times 6, 5 \times 5)$ .



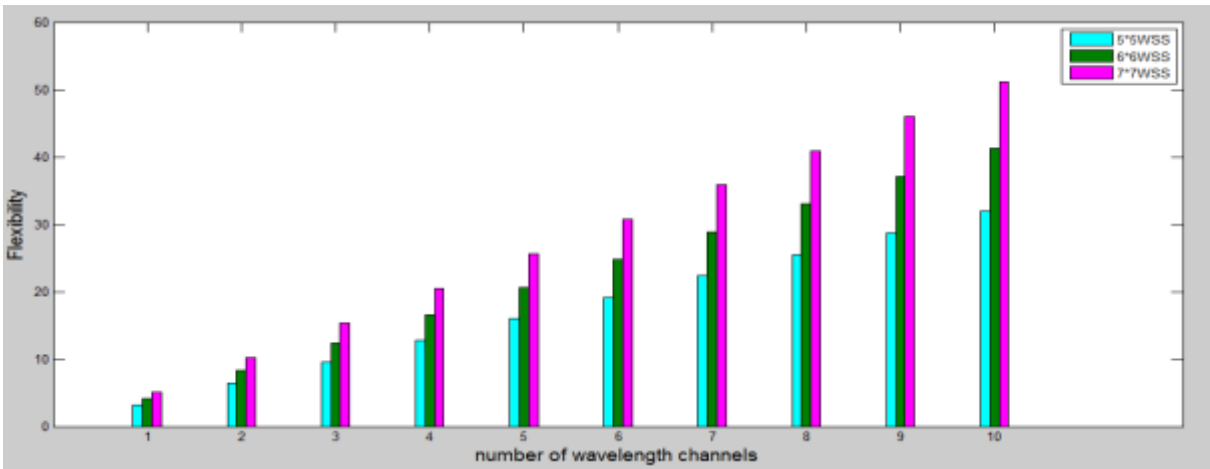


الشكل (6): مرونة المبدل  $N \times M$  بالاعتماد على عدد منافذ الدخل وعدد منافذ الخرج بدلالة عدد الأطوال الموجية  
يبين الشكل (6) أن مرونة WSS تزداد بزيادة عدد القنوات التي يدعمها WSS وزيادة عدد نسخ طول الموجة التي ترسل بالوقت نفسه وعندما يتساوى عدد منافذ الدخل والخرج. ويبين الجدول (1) قيم المرونة الموافقة للشكل (6).

الجدول (1): قيم مرونة المبدل  $N \times M$  بالاعتماد على عدد منافذ الدخل وعدد منافذ الخرج بدلالة عدد الأطوال الموجية

Wavelength channels \	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
1×9WSS	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
2×8WSS	1.86	3.73	5.59	7.45	9.32	11.2	13	14.9	16.8	18.6
3×7WSS	2.55	5.11	7.66	10.2	12.8	15.3	17.9	20.4	23	25.5
4×6WSS	3.02	6.04	9.06	12.1	15.1	18.1	21.1	24.2	27.2	30.2
5×5WSS	3.19	6.38	9.57	12.8	15.9	19.1	22.3	25.5	28.7	<b>31.9</b>

يبين الجدول (1) أن أعلى قيمة مرونة حصلنا عليها ( $F(s)=31.9$ ) باستخدام المبدل  $5 \times 5$ WSS وعند إرسال 10 قنوات.  
يبين الشكل (7) مقارنة مرونة مبدل  $N \times M$  بالاعتماد على عدد منافذ الدخل ومنافذ الخرج معاً؛ حيث ندرس تبعاً لذلك مرونة كل من المبدلات ( $7 \times 7, 6 \times 6, 5 \times 5$ ) وذلك بدلالة عدد الأطوال الموجية التي يمكن إرسالها.



الشكل (7): مرونة المبدل  $N \times M$  بالاعتماد على عدد منافذ الدخل وعدد منافذ الخرج معاً بدلالة عدد الأطوال الموجية

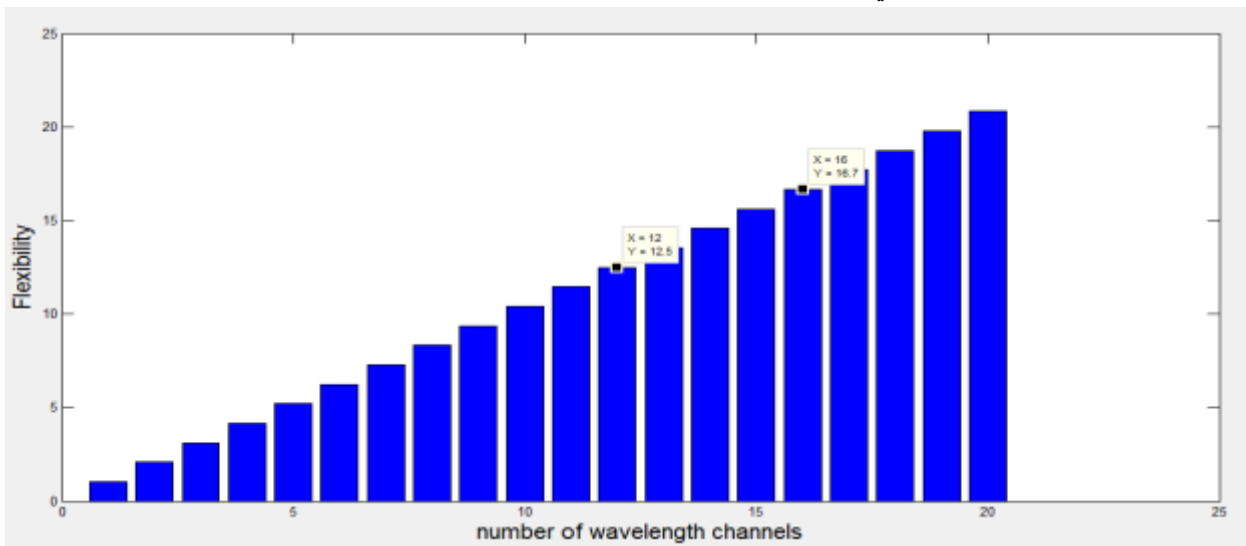
يبين الشكل السابق أن مرونة WSS تزداد بزيادة عدد منافذ الدخل والخرج، ويعرض الجدول (2) القيم الموافقة لمرونة المبدلات (7×7, 6×6, 5×5) المبينة في الشكل (7).

الجدول (2): مرونة المبدل N×M بالاعتماد على عدد منافذ الدخل وعدد منافذ الخرج معاً بدلالة عدد الأطوال الموجية

wavelength channels	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
5×5WSS	3.19	6.38	9.57	12.8	15.9	19.1	22.3	25.5	28.7	31.9
6×6WSS	4.12	8.25	12.4	16.5	20.6	24.7	28.9	33	37.1	41.2
7×7WSS	5.12	10.2	15.4	20.5	25.6	30.7	35.8	40.9	46.1	<b>51.2</b>

يبين الجدول (2) أن أعلى مرونة حصلنا عليها (F(s)=51.2) باستخدام المبدل 7×7WSS وعند إرسال 10 قنوات. كما ذكرنا تم حساب انتقائية الحزمة لمبدل WSS (1×10) معتمد على مرايا MEMS في دراسة سابقة، وذلك ضمن الحزمة C، وعند طول موجة مركزي ( $\lambda_{center} = 1547.5nm$ )، ويعرض حزمة (1547nm- 125GHz) (1548nm) وحصلنا على قيمة انتقائية ( $\Delta\lambda = 0.08nm$ ) عند تطبيق مرور واحد للإشارة الضوئية ضمن المبدل [13]. تسمح قيمة الانتقائية التي تم الحصول عليها بعدد قنوات يبلغ حوالي 12 قناة.

حسبنا قيمة المرونة الموافقة لمرور مزدوج للإشارة ضمن المبدل، فحصلنا على قيمة انتقائية ( $\Delta\lambda = 0.06nm$ ) [14]. نلاحظ أن قيمة انتقائية المبدل قد ازدادت (أصبحت قيمة  $\Delta\lambda$  أقل) عند تطبيق التمرير المزدوج بمقدار (25%) مما يسمح بزيادة عدد قنوات الشبكة ليصبح حوالي 16 قناة ضمن نفس المجال المسموح من الطيف. يبين الشكل (8) مقارنة قيمة المرونة الموافقة لمرور واحد للإشارة ضمن المبدل، وقيمة المرونة عند تطبيق التمرير المزدوج للإشارة وذلك بدلالة عدد الأطوال الموجية التي يمكن إرسالها.

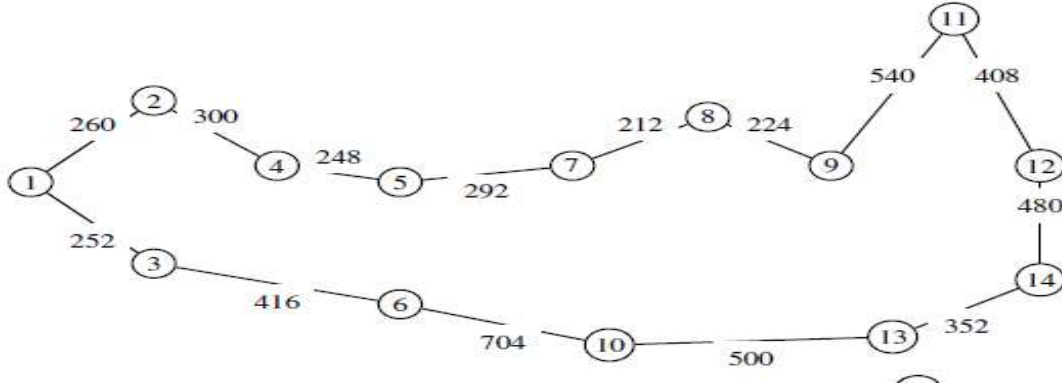


الشكل (8): مقارنة قيمة مرونة المبدل لمرور واحد للإشارة وقيمة المرونة عند تطبيق التمرير المزدوج للإشارة

يبين مخطط المرونة المبين في الشكل (8) أن قيمة مرونة المبدل عند مرور الإشارة لمرة واحدة ضمن المبدل والتي توافق عدد القنوات المسموح بها (حوالي 12 قناة) هي  $(F(s)=12.5)$ . كما يبين أن قيمة مرونة المبدل عند تطبيق التمرير المزدوج والتي توافق عدد القنوات المسموح بها (حوالي 16 قناة) هي  $(F(s)=16.7)$ . نلاحظ أن مرونة المبدل قد ازدادت بمقدار (33.6%) عند تطبيق المرور المزدوج للإشارة ضمن المبدل. بينت هذه النتيجة أهمية تطبيق التمرير المزدوج ضمن مبدل WSS، ويتضح ذلك في زيادة سعة هذه الشبكات ضمن نفس المجال المسموح من الطيف، واكتساب الشبكة مرونة طيف أعلى.

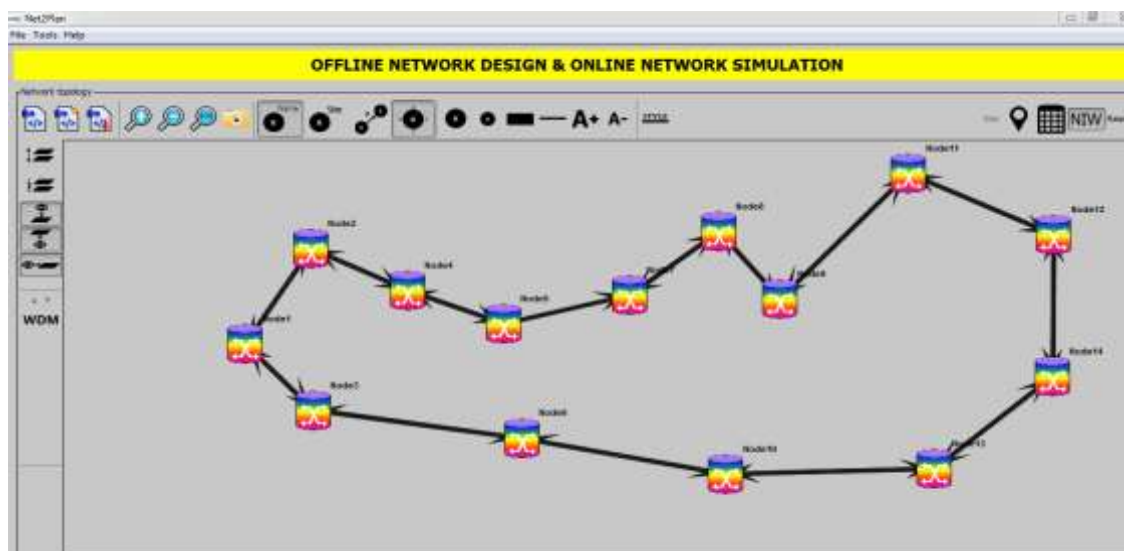
## 2-2 محاكاة شبكة NSFNET الحلقية:

قدم هذا البحث محاكاة لشبكة NSFNET الحلقية المكونة من 14 عقدة وذلك باستخدام المحاكى (net2plan)، حيث يؤمن Net2Plan واجهة مستخدم رسومية (GUI) وواجهة سطر أوامر (CLI). تتضمن الواجهتين تصميم للشبكة غير المتصلة بالإنترنت؛ حيث يهدف هذا التصميم إلى تنفيذ خوارزميات التوجيه وتخصيص طول الموجة routing algorithm and wavelength assignment (RWA)، والتي تستقبل تصميم الشبكة كدخل وتقوم بتعديل هذا التصميم بصيغ مختلفة مثل تحسين التوجيه والسعات والطوبولوجيا. كما تتضمن أيضاً محاكاة للشبكة عبر الإنترنت، والتي تسمح بتفاعل الشبكة مع الأحداث المختلفة الناتجة عن متطلبات حركة المرور المتغيرة بمرور الوقت. تتكون شبكة NSFNET الحلقية من 14 عقدة يصل بينها 14 ليف ثنائي الاتجاه، ويبين الشكل (9) المسافة بين كل عقدتين من عقد الشبكة [15]:



الشكل (9): شبكة NSFNET الحلقية

تم إنشاء الشبكة باستخدام مكتبة NIW الموجودة ضمن برنامج net2plan والتي تسمح بتمثيل الشبكات الضوئية المرنة. ويبين الشكل (10) تمثيل الشبكة ضمن برنامج net2plan.



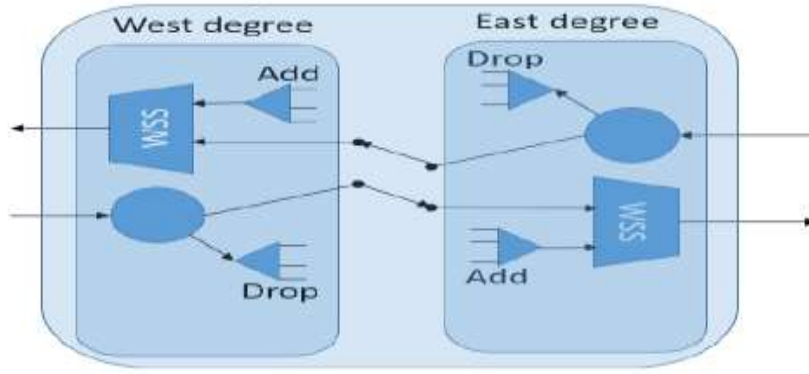
الشكل (10): تمثيل شبكة NSFNET الحلقية ضمن برنامج net2plan

يتضمن المحاكى تقارير تتضمن معلومات التوجيه وتخصيص الطيف في الشبكة؛ حيث أن الخوارزمية المستخدمة في توجيه المسارات الضوئية ضمن العقد في الشبكة الضوئية المرنة هي خوارزمية توجيه وتخصيص طول الموجة (RWA)، والتي تعمل على تخصيص طلبات الاتصال عند تلقائها وتحديد مسارها وتعديلها [16]. ويبين الجدول (3) إحصائيات العقد المستخدمة في شبكة NSFNET الحلقية.

الجدول (3): إحصائيات العقد المستخدمة في شبكة NSFNET الحلقية

OADM stats	
Number of OADMs (#total / #Non-blocking ROADM / #Filterless)	14 / 14 / 0
Number of OADMs	14
Node in degree (min/average/max)	2 / 2 / 2
Node out degree (min/average/max)	2 / 2 / 2

يبين الجدول (3) أن عدد العقد المستخدمة هي 14 عقدة، وأن نوع هذه العقد هو Non-blocking ROADM، بالإضافة إلى أن العقدة من الدرجة الثانية، ويعود ذلك إلى البنية الحلقية للشبكة حيث تتصل كل عقدة بعقدتين فقط. ويوضح الشكل (11) عقدة ROADM من الدرجة الثانية.



الشكل (11): عقدة ROADM من الدرجة الثانية

تم ضبط عقد ROADM ليكون المبدل WSS المعتمد على المرايا MEMS المكون الأساسي لهذه العقد والذي تمت دراسته [13-14]. وبناء على ذلك تم محاكاة شبكة NSFNET الحلقية في حالتي المرور الوحيد والمرور المزدوج للإشارة ضمن مبدل WSS.

#### 2-2-1 محاكاة شبكة NSFNET الحلقية في حالة المرور الوحيد للإشارة ضمن مبدل WSS:

تم ضبط عقد ROADM لتكون من النمط Broadcast-and-select (B&S). تكون وحدات البث (Broadcast) عبارة عن مقسمات أساسية في هذه الحالة، وبالتالي يتم بث الإشارة إلى جميع درجات الخرج والوحدات غير الموجهة. في المقابل يتم تنفيذ وحدات الإخراج (select) عبر مبدل WSS، والتي تسمح بالانتشار إلى درجة الإشارات المستقبلية المرغوبة فقط. وتم ضبط تخميد WSS لتكون قيمته (0.26dB) وقيمة تشتت نمط الاستقطاب للمبدل WSS هي (PMD=0.5ps).

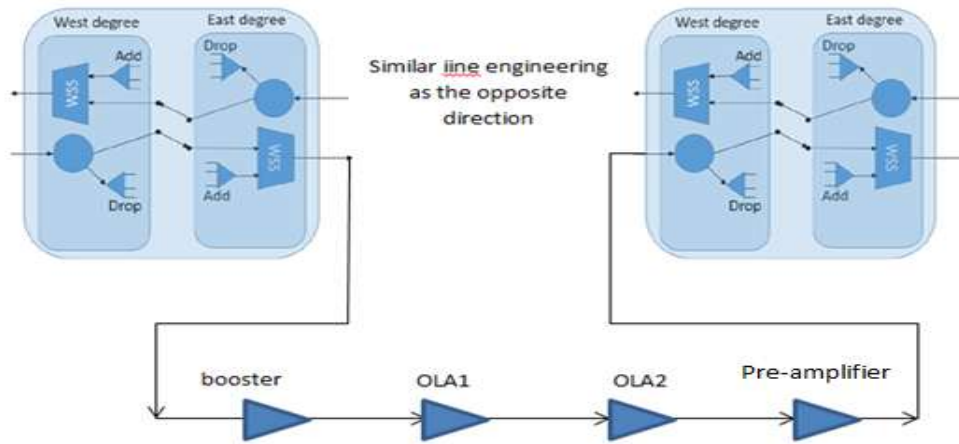
يوضح الجدول (4) عدد المسارات الضوئية المستخدمة ويعطي مقدار الحركة الكلية في المسارات الضوئية (total traffic=18200Gbps) وقيمة الحركة الضائعة (traffic in blocked lightpaths=7000)، وبالتالي تكون قيمة الحركة الفعلية (traffic=18200-7000=11200) أي مايعادل 62.2% من قيمة الحركة الكلية.

الجدول (4): إحصائيات الألياف وحركة المرور والمسارات الضوئية في شبكة NSFNET الحلقية

Traffic stats	
Number of lightpath requests (1+1 protected or not)	182
Number of 1+1 lightpath requests	0
Total offered traffic (Gbps) in lightpaths	18200
Total traffic (Gbps) in blocked lightpaths	7000(block prob: 0.38)

تتخفف الاستطاعة المستقبلية بسبب المسافات الكبيرة بين العقد لذلك لابد من إضافة مضخمات ضوئية بين العقد لزيادة الاستطاعة المستقبلية للمسارات الضوئية، حيث يوضع معزز (booster) في بداية الليف ليعوض التخميد الذي تعاني منه المسارات الضوئية ضمن العقد. وتوضع مضخمات Add optical line amplifiers (OLA) لتعويض

التخميد الحاصل في امتداد الليف السابق للمضخم، وتوضع مضخمات (pre-amplifier) في نهاية الليف لتعويض التخميد الحاصل في امتداد الليف السابق، ويبين الشكل (12) نوع المضخمات الضوئية المضافة بين كل عقدتين.



الشكل (12): المضخمات الضوئية المضافة بين كل عقدتين

يبين الجدول (5) عدد المضخمات المستخدمة بين عدد من العقد (1,2)(2,4)(9,11)، ويبين التشتت اللوني لكل ليف ضوئي يصل بين هذه العقد واستطاعة كل ليف.

الجدول (5): عدد المضخمات المستخدمة وبارامترات الألياف الضوئية ضمن الشبكة

Fiber	length	Frequency slots	Amplifier	Chromatic Dispersion	Power (input)	Power (output)
1 ↔ 2	260km	79 ↔ 90	5	3900ps/nm	7.79dBm	-3.04dBm
2 ↔ 4	300km	79 ↔ 90	6	4500ps/nm	7.79dBm	-2.92dBm
9 ↔ 11	540km	79 ↔ 90	11	8100ps/nm	7.79dBm	-3.46dBm

يمكن من الجدول (5) الخسارة في كل ليف ضوئي:

$$\text{Loss}(1 \leftrightarrow 2) = 7.79 - (-3.04) = 10.83 \text{ dBm}$$

$$\text{Loss}(2 \leftrightarrow 4) = 7.79 - (-2.92) = 10.71 \text{ dBm}$$

$$\text{Loss}(9 \leftrightarrow 11) = 7.79 - (-3.46) = 11.25 \text{ dBm}$$

تختلف الخسارة في كل ليف ضوئي تبعاً للمسافة بين العقد وتبعاً لتوضع المضخمات؛ حيث تتوضع المضخمات بين العقدتين (1,2) على بعد (43.33km)، بينما تتوضع بين العقدتين (2,4) على بعد (42.86km) وبين العقدتين (9,11) على بعد (45km)، لذلك تزداد الخسارة بزيادة المسافة بين المضخمات. كما أن التشتت اللوني يزداد بزيادة طول الليف أي يزداد بزيادة البعد بين العقد. يبين الجدول (6) إحصائيات الإشارة لعدد من المسارات الضوئية.

الجدول (6): إحصائيات الإشارة لعدد من المسارات الضوئية

Ligthpath	Length	Trav. nodes	Propagation delay	Amplifier	OSNR	PMD
1 ↔ 2	260km	2	1.3ms	5	30.21dB	8.22ps
1 ↔ 4	560km	3	2.8ms	11	26.92 dB	12.03ps
6 ↔ 7	1768km	7	8.84ms	35	21.9 dB	21.35ps

يجتاز المسار الضوئي بين العقدتين (1,2) العقدتين 1,2 ويبلغ عدد المضخمات الضوئية 5، ويجتاز المسار الضوئي بين العقدتين (1,4) العقد 1,2,4 ويبلغ عدد المضخمات الضوئية 11، بينما يجتاز المسار الضوئي بين العقدتين (6,7) العقد 6,3,1,2,4,5,7 ويبلغ عدد المضخمات الضوئية 35، وينتج عن ذلك مسافة طويلة بين العقدتين (6,7)، وبالتالي زيادة عدد المضخمات بين العقدتين مما يؤدي إلى انخفاض نسبة الإشارة إلى الضجيج مقارنة مع المسارات الضوئية الأقصر.

يبين الجدول (7) أداء المسار ضوئي بين العقدتين (1,4)، حيث يبين استطاعة الدخل والخرج ونسبة الإشارة إلى الضجيج والتشتت اللوني (CD) Chromatic Dispersion وتشتت نمط الاستقطاب Polarization Mode Dispersion (PMD) عند دخل وخرج كل عقدة وكل مضخم من المضخمات المستخدمة.

الجدول (7) أداء المسار ضوئي بين العقدتين (1,4)

Node	Distance Km	Power (input) dBm	Power (output) dBm	OSNR (input) dB	OSNR (output) dB	CD (input) Ps/nm	CD (output) Ps/nm	PMD (input) Ps	PMD (output) Ps
node1	0	0	-	-	-	0	0	0	0
Node1-booster	0	-6.13	-3	$\infty$	45.81	0	0	0.71	0.87
OLA 0	43.33	-13.83	-3	45.81	37.43	650	650	3.4	3.44
OLA 1	86.67	-13.83	-3	37.43	34.74	1300	1300	4.76	4.79
OLA 2	130	-13.83	-3	34.74	33.1	1950	1950	5.81	5.83
OLA 3	173.33	-13.83	-3	33.1	31.91	2600	2600	6.7	6.71
OLA 4	216.67	-13.83	-3	31.91	30.97	3250	3250	7.48	7.49
Node2-pre amplifier	260	-13.83	-3	30.97	30.21	3900	3900	8.19	8.2
Node2	260	-3	-6.13	30.21	30.21	3900	3900	8.2	8.22
Node2-booster	260	-6.13	-3	30.21	30.09	3900	3900	8.22	8.23
OLA 0	302.86	-13.71	-3	30.09	29.47	4542.86	4542.86	8.86	8.87
OLA 1	345.71	-13.71	-3	29.47	28.93	5185.71	5185.71	9.46	9.47
OLA 2	388.57	-13.71	-3	28.93	28.44	5828.57	5828.57	10.02	10.03
OLA 3	431.43	-13.71	-3	28.44	28.01	6471.43	6471.43	10.55	10.56
OLA 4	474.29	-13.71	-3	28.01	27.61	7114.29	7114.29	11.06	11.07
OLA 5	517.14	-13.71	-3	27.61	27.25	7757.14	7757.14	11.54	11.56
Node4-pre amplifier	560	-13.71	-3	27.25	26.92	8400	8400	12.01	12.02
Node4	560	-3	-12	26.92	26.92	8400	8400	12.02	12.03

## 2-2-2 محاكاة شبكة NSFNET الحلقية في حالة المرور المزدوج للإشارة ضمن مبدل WSS:

تعتمد عقدة ROADM بشكل رئيسي على مبدلات WSS، وبالتالي يعكس تحسين أداء مبدل WSS تأثيراً إيجابياً لعمل ROADM كنتيجة لذلك. سمح تطبيق التمرير المزدوج على مبدل WSS بزيادة عدد قنوات الشبكة ضمن نفس عرض الحزمة المستخدم؛ حيث ازداد عدد القنوات من 12 قناة ضمن عرض الحزمة المستخدم (1547nm) إلى 16 قناة ضمن عرض الحزمة نفسها المستخدم عند تطبيق مرور واحد للإشارة ضمن مبدل WSS إلى 16 قناة ضمن عرض الحزمة نفسها المستخدم عند تطبيق التمرير المزدوج للإشارة ضمن مبدل WSS [14]. ساهمت زيادة عدد القنوات الناتجة عن التمرير المزدوج في زيادة سعة هذه الشبكات، واكتساب الشبكة مرونة طيف أعلى مع مردود لا تزال تعتبر قيمته ممتازة. لكن قد يترتب على ذلك تأثيرات سلبية على العقد الضوئية التي تعتمد في بنيتها على مبدل WSS وعلى أداء المسارات الضوئية بين العقد الضوئية المكونة للشبكة؛ لذلك قمنا بدراسة زمن التأخير لكل مسار ضوئي، ودراسة استطاعة الدخل والخرج ونسبة الإشارة إلى الضجيج والتشتت اللوني وتشتت نمط الاستقطاب عند دخل وخرج كل عقدة، وأيضاً قمنا بدراسة استطاعة الدخل والخرج والتشتت اللوني للألياف الضوئية التي تصل بين عقد الشبكة وذلك عند تطبيق التمرير المزدوج. يوضح الجدول (8) عدد المسارات الضوئية المستخدمة ويعطي مقدار الحركة الكلية في المسارات الضوئية (total traffic=18200Gbps) وقيمة الحركة الضائعة (traffic in blocked lightpaths=4600)، وبالتالي تكون قيمة الحركة الفعلية (traffic=18200-4600=11200) أي ما يعادل 75% من قيمة الحركة الكلية.

الجدول (8): إحصائيات الألياف وحركة المرور والمسارات الضوئية في شبكة NSFNET الحلقية عند المرور المزدوج

Traffic stats	
Number of lightpath requests (1+1 protected or not)	182
Number of 1+1 lightpath requests	0
Total offered traffic (Gbps) in lightpaths	18200
Total traffic (Gbps) in blocked lightpaths	4600(block prob: 0.25)

بالمقارنة بين الجدولين (4) و(8) نلاحظ أن نسبة الحركة الفعلية عند تطبيق التمرير المزدوج (75%) قد أصبحت أكثر من نسبة الحركة الفعلية عند تطبيق المرور الواحد (62%). يبين الجدول (9) توجيه بعض المسارات الضوئية ضمن العقد في الشبكة عند تطبيق التمرير المزدوج، ويبين طول المسار الضوئي المستخدم بالإضافة إلى التأخير الزمني الناتج عن البعد بين العقد حيث يزداد التأخير الزمني بزيادة طول المسار الضوئي. ويبين أن معدل الخط لكل مسار ضوئي هو (line rate=100Gbps) ويبين رقم الحيز الترددي المستخدم لكل مسار ضوئي. كما يبين عدد المضخمات المستخدمة بين عدد من العقد (1,2)(2,4)(9,11)، ويبين التشتت اللوني لكل ليف ضوئي يصل بين هذه العقد واستطاعة كل ليف وذلك عند تطبيق التمرير المزدوج للإشارة.



الجدول (9) عدد المضخمات المستخدمة وبارامترات الألياف الضوئية ضمن الشبكة عند تطبيق التمرير المزدوج

Fiber	Length Km	Frequency slots	Amplifier	Chromatic Dispersion ps/nm	Power (input) dBm	Power (output) dBm
1 ↔ 2	260	90 ↔ 105	5	3900	9.04	-1.79
2 ↔ 4	300	90 ↔ 105	6	4500	9.04	-1.67
9 ↔ 11	540	90 ↔ 105	11	8100	8.76	-2.49

يمكن من الجدول (9) حساب الخسارة في كل ليف ضوئي:

$$\text{Loss}(1 \leftrightarrow 2) = 9.04 - (-1.79) = 10.83 \text{ dBm}$$

$$\text{Loss}(2 \leftrightarrow 4) = 9.04 - (-1.67) = 10.71 \text{ dBm}$$

$$\text{Loss}(9 \leftrightarrow 11) = 8.76 - (-2.49) = 11.25 \text{ dBm}$$

بالمقارنة بين خسارة الألياف في حالتها التمرير الواحد والتمرير المزدوج نجد أن الخسارة هي نفسها.

يبين الجدول (10) إحصائيات الإشارة لعدد من المسارات الضوئية.

الجدول (10) إحصائيات الإشارة لعدد من المسارات الضوئية عند تطبيق التمرير المزدوج

Ligthpath	Length Km	Trav. nodes	Propagation delay (ms)	Amplifier	OSNR (dB)	PMD Ps
1 ↔ 2	260	2	1.3	5	30.21	8.22ps
1 ↔ 4	560	3	2.8	11	26.92	12.03ps
6 ↔ 7	1768	7	8.84	35	21.9	21.35ps

يبين الجدول (10) إحصائيات الإشارة لبعض المسارات الضوئية عند كل عقدة، حيث يبين نسبة الإشارة إلى الضجيج وهي نفس قيمة نسبة الإشارة إلى الضجيج عند تطبيق المرور الأول، بالإضافة إلى قيمة التشتت اللوني المستقبلية وقيمة تشتت نمط الاستقطاب لكل مسار ضوئي.

يبين الجدول (11) أداء المسار ضوئي بين العقدتين (1,4)، حيث يبين استطاعة الدخل والخرج ونسبة الإشارة إلى الضجيج والتشتت اللوني وتشتت نمط الاستقطاب عند دخل وخرج كل عقدة وكل مضخم من المضخمات المستخدمة عند تطبيق التمرير المزدوج:

الجدول (11): أداء المسار ضوئي بين العقدتين (1,4)

Node	Distance Km	Power (input) dBm	Power (output) dBm	OSNR (input) Db	OSNR (output) Db	CD (input) Ps/nm	CD (output) Ps/nm	PMD (input) Ps	PMD (output) Ps
node1	0	0	-	-	-	0	0	0	0
Node1-booster	0	-6.26	-3	∞	45.68	0	0	0.71	0.87
OLA 0	43.33	-13.83	-3	45.68	37.41	650	650	3.4	3.44
OLA 1	86.67	-13.83	-3	37.41	34.74	1300	1300	4.76	4.79
OLA 2	130	-13.83	-3	34.74	33.09	1950	1950	5.81	5.83
OLA 3	173.33	-13.83	-3	33.09	31.9	2600	2600	6.7	6.71
OLA 4	216.67	-13.83	-3	31.9	30.97	3250	3250	7.48	7.49
Node2-pre amplifier	260	-13.83	-3	30.97	30.2	3900	3900	8.19	8.2
Node2	260	-3	-6.13	30.2	30.2	3900	3900	8.2	8.22
Node2-booster	260	-6.26	-3	30.2	30.08	3900	3900	8.22	8.23

OLA 0	302.86	-13.71	-3	30.08	29.46	4542.86	4542.86	8.86	8.87
OLA 1	345.71	-13.71	-3	29.46	28.92	5185.71	5185.71	9.46	9.47
OLA 2	388.57	-13.71	-3	28.92	28.44	5828.57	5828.57	10.02	10.03
OLA 3	431.43	-13.71	-3	28.44	28.01	6471.43	6471.43	10.55	10.56
OLA 4	474.29	-13.71	-3	28.01	27.61	7114.29	7114.29	11.06	11.07
OLA 5	517.14	-13.71	-3	27.61	27.25	7757.14	7757.14	11.54	11.56
Node4-pre amplifier	560	-13.71	-3	27.25	26.92	8400	8400	12.01	12.02
Node4	560	-3	-12	26.92	26.92	8400	8400	12.02	12.03

عند مقارنة النتائج على مستوى الشبكة بين حالتي المرور الواحد والمرور المزدوج للإشارة ضمن مبدل (WSS) نجد أن: عند تتبع المسار الخارج من العقدة (1) تنخفض الاستطاعة عند مدخل المعزز وذلك عند تطبيق التمرير المزدوج، ويعود ذلك إلى خسارة الدخل المرتبطة بالمبدل WSS، والذي يشكل البنية الأساسية للعقد المكونة للشبكة؛ حيث تتضاعف خسارة الدخل للمبدل عند تطبيق التمرير المزدوج، ولكن كما تم ذكره سابقاً يوضع المعزز في بداية الليف ليعوض التخميد الذي تعاني منه المسارات الضوئية ضمن العقد، وبالتالي يتم ضبط قيمة استطاعة الخرج في الحالتين لتكون (-3dBm). لكن نتيجة لذلك انخفضت قيمة نسبة الإشارة إلى الضجيج بنسبة (0.01dB) عند بداية العقدة (2) وتعتبر هذه القيمة صغيرة جداً، وبالتالي نستنتج أن: هناك تطابق في خسارة الاستطاعة في الحالتين، كما أن هناك تطابق في نسبة الإشارة إلى الضجيج تقريباً، وهناك تطابق في التأخير الزمني أثناء المرور ضمن المسارات الضوئية بين العقد، بالإضافة إلى وجود تطابق في قيم التشننت اللوني وقيم تشننت نمط الاستقطاب في الحالتين. وهذا ما يؤكد فعالية تطبيق التمرير المزدوج ضمن المبدل؛ حيث ازدادت الانتقائية وبالتالي ازداد عدد القنوات ضمن نفس الحزمة المستخدمة، ونتيجة لذلك ازدادت الحركة الفعلية ضمن الشبكة.

### الاستنتاجات والتوصيات:

قدمت هذه الدراسة محاكاة لمرونة مبدل WSS المعتمد على مرآة MEMS عند مرور الإشارة الضوئية ضمن العناصر الضوئية المكونة لهذا المبدل، وذلك بالاعتماد على عدد منافذ الدخل وعدد منافذ الخرج وعدد القنوات التي يمكن إرسالها. أضافت هذه الدراسة محاكاة لمرونة المبدل عند تطبيق التمرير المزدوج للإشارة الضوئية ضمن المبدل، وبينت أهمية تطبيق التمرير المزدوج في زيادة مرونة مبدل WSS، وبالتالي اكتساب الشبكة مرونة طيف أعلى. قدمت هذه الدراسة تصميم شبكة ضوئية حلقيية يشكل مبدل WSS المصمم للعمل بآلية التمرير المزدوج البنية الأساس للعقد المكونة للشبكة؛ حيث أكدت فعالية تطبيق التمرير المزدوج ضمن المبدل؛ فازدادت الانتقائية وبالتالي ازداد عدد القنوات ضمن نفس الحزمة المستخدمة، ونتيجة لذلك ازدادت الحركة الفعلية ضمن الشبكة. نقترح تصميم شبكة ضوئية أخرى بطوبولوجيا مختلفة يشكل مبدل WSS المصمم للعمل بآلية التمرير المزدوج البنية الأساس لها، ودراسة معيار المرونة لهذه الشبكة بالاعتماد على مرونة كل مكون من مكوناتها الفيزيائية.

## References:

- [1] Shufang He, Yang Qiu and Jing Xu " Invalid-Resource-Aware Spectrum Assignment for Advanced-Reservation Traffic in Elastic Optical Network" Sensors,pp.1-13, 2020.
- [2] Takashi Miyamura, Akira Misawa " Improving efficiency of network resources in elastic optical transport network by using in-network cache functions" Optical Switching and Networking, vol.42, 2021.
- [3] G.Sava, K. Manouskis, G.Ellinas. "Confidentiality meets protection in elastic optical networks" Optical Switching and Networking, vol. 42, 2021.
- [4] Nattapan Kitswan, Kaito Akaki, Praphon Pavarana Koon, Avishex Nay "Spectrum allocation scheme considering spectrum slicing in elastic optical networks" IEEE/OSA Journal of Optical Network, vol. 13, pp. 169–181, July 2021
- [5] Joana Socrates Dantas et al. "Challenges and Requirements of a Control Plane for Elastic Optical Networks" Preprint submitted to Networks Communication, May 13, 2014.
- [6] S. Poole, S. Frisken, M. Roelens and C. Cameron "Bandwidth-flexible ROADMs as network elements" in OTuE1, OSA/OFC/NFOEC , 2011.
- [7] R. Ryf et al. "Scalable wavelength-selective crossconnect switch based on MEMS and planar waveguides," 27th European Conference on Optical Communication, ECOC '01, Volume 6,PP. 76 – 77, 30 Sept-4 Oct. 2001.
- [8] Eldada L. "Application Note Wavelength Selective Switching in Optical Communications" 27 September 2016.
- [9] Bijoy Chand Chatterjee, Nityananda Sarma, and Eiji Oki "Routing and Spectrum Allocation in Elastic Optical Networks: A Tutorial" IEEE Communication Surveys & Tutorials, vol. 17, no. 3, Third Quarter 2015.
- [10] N. Amaya, G. Zervas, and D. Simeonidou, "Introducing node architecture flexibility for elastic optical networks," IEEE/OSA Journal of Optical Communications and Networking, vol. 5, no. 6, pp. 593-608, 2013
- [11] Adarani Peters, Emilio Hugues-Salas, Matthias Gunkel and Georgios Zervas" Key Performance Indicators for Elastic Optical Transponders and ROADMs: The Role of Flexibility" Optical Switching and Networking. vol 25, pp 1-12,2017.
- [12] A. Peters, E. Hugues-Salas, G. Zervas and D. E. Simeonidou, "Measuring Flexibility and Design Trade-offs of N x M SSS-based ROADMs and BVTs," in Optical Fiber Communication Conference, 2015.
- [13] Al-Haytham Al-Radwan, Hadeel Issa, Asala Khaddour "Proposing a mathematical model for the WSS wavelength-selective modulator work mechanism based on MEMS microelectromechanical mirrors to improve the performance of flexible optical networks EON" Tishreen University Journal for Research and Scientific Studies, Engineering Sciences Series, Volume (44), Issue ( 1), the year 2022
- [14]Haitham Al-Radwan, Hadeel Issa, Asala Khaddour "Improving the Performance of EON Flexible Optical Networks by Using the Wavelength Selective Switch (WSS) based on Double Passing of the Optical Signal" Tartous University Journal for Research and Scientific Studies, Engineering Science Series, Volume (6), Number (10) , year 2022
- [15] Mohamed Musa, Taisir Elgorashi, and Jaafar Elmirghani" Energy Efficient Routing and Network Coding in Core Networks" School of Electronic and Electrical Engineering, University of Leeds, LS2 9JT, UK.
- [16] Seema Ansari and Adeel Ansari "Comparative Analysis of Routing and Wavelength Assignment Algorithms used in WDM Optical Networks, Research Journal of Applied Sciences, Engineering and Technology vol. 13, no. 7,pp 2646-2654, 2014.