

دراسة وتحسين تسطح ربح مضخم رامان متعدد المضخات من أجل عرض حزمة 90nm

د. هديل عيسى*

نعم عباس**

(تاريخ الإيداع 28 / 11 / 2017. قُبل للنشر في 21 / 6 / 2018)

□ ملخص □

تعتمد شبكات الاتصالات الضوئية الحديثة على تقنية التجميع بتقسيم طول الموجة (Wavelength Division Multiplexing (WDM))، حيث كان لابد من العمل على تطوير كامل عناصر الشبكة لتواكب الحاجة المتزايدة لعرض حزمة عريض وتأخير زمني قليل وموثوقية عالية. والاستعاضة عن التجهيزات الإلكترونية- ضوئية بالتجهيزات الضوئية بشكل كامل، وأخذت المضخمات الضوئية محوراً هاماً في هذا التطور، وكان لمضخم رامان (RAMAN) حيزاً كبيراً من الاهتمام لما يقدمه من ربح عالي وتسطح ربح كبير. ركزنا في هذه المقالة على دراسة تأثير كل من بارامترات الليف، وبارامترات المضخة، على أداء مضخم رامان الضوئي من حيث ربحه وعرض الحزمة واستطاعة المضخة المستخدمة. كما بينا تأثير تعدد المضخات على أداء هذا المضخم وعلى تسطح ربحه وعرض الحزمة، وتوصلنا إلى تسطح ربح على عرض حزمة واسع. تمت المحاكاة باستخدام برنامجي MATLAB و OPTISYSTEM بالاعتماد على المعادلات الرياضية التي تصف نموذج المضخم من أجل عرض حزمة 1450nm-1650nm.

الكلمات المفتاحية: ألياف ضوئية، مضخم رامان، تقنية تعدد المضخات، أنواع الضخ.

* مدرس، قسم هندسة الاتصالات والإلكترونيات، كلية الهندسة الميكانيكية والكهربائية، جامعة تشرين، اللاذقية سورية.
مشرف على الأعمال، قسم هندسة الاتصالات والإلكترونيات، كلية الهندسة الميكانيكية والكهربائية، جامعة تشرين، اللاذقية سورية

Studying and Improving the Gain Flattening of a Multi-Pump Raman Amplifier for a 90nm Bandwidth

Dr. Hadeel Issa^{*}
Nagham Abbas^{**}

(Received 28 / 11 / 2017. Accepted 21 / 6 / 2018)

□ ABSTRACT □

Modern and future optical networks rely on wavelength divisional multiplexing technology, it was necessary to develop the whole network elements to keep up with the increasing need to offer a wide band and a very short time delay and high reliability, and replacement of electro optic equipment with optical equipment.

Optical amplifiers have taken an important part in this evolution, and the Raman amplifier (RAMAN) had a great deal of attention, for its high gain and flattened gain.

In this paper, we have examined the effect of both fiber parameters and pump parameters on the performance of Raman optical amplifier in terms of gain and bandwidth and the used pump power.

This research demonstrated the effect of multi pump on this amplifier performance and its flattening and bandwidth, and we reached a flattening gain on a wide bandwidth.

The simulation was done by using MATLAB and OPTISYSTEM program based on the mathematical equations that describe the amplifier model for 1450nm-1650nm bandwidth.

Keyword: optical fiber, RAMAN amplifier, multi pump Technique, pumping configuration.

^{*} Assistant Professor, Department of Communication and Electronics, Faculty of mechanical and electrical engineering, Tishreen University, Lattakia, Syria.

^{**} Technical Member, Department of Communication and Electronics, Faculty of mechanical and electrical engineering, Tishreen University, Lattakia, Syria.

مقدمة:

للمضخمات الضوئية أهمية كبيرة في ثورة أنظمة الاتصالات الضوئية الحالية، حيث قدمت سعة عالية من أجل الشبكات المتباعدة [1,2]، و كان الاهتمام الأكبر بمضخم رامان، الذي يعتمد على عملية لاختطية تسمى تبعثر رامان المحفز [1-5] (Stimulated Raman Scattering SRS)، لما يمتاز به من:

- مرونة لتضخيم مجال واسع من الأطوال الموجية.

- الربح المسطح العريض عند استخدام الضخ المتعدد.

هذه الأسباب وغيرها جعلت منه محور اهتمام الباحثين خصوصاً في منتصف التسعينات عندما توفرت مضخات باستطاعة عالية، وانتشر مؤخراً التضخيم متعدد المضخات والذي حقق زيادة بالربح في أنظمة التجميع بتقسيم طول الموجة من أجل المسافات الطويلة ومعدلات الإرسال العالية متفوقة بذلك على مضخم Erbium Doped Fiber (Amplifier EDFA) [1-5].

كما أن مضخم رامان المستخدم لليف السيليكا يمكن من توسيع مجال التضخيم مع تحقيق أداء جيد وموثوقية عالية. بالإضافة إلى أن مضخم رامان له خصائص فريدة من حيث عرض الحزمة الكبير وضجيج اقل واستطاعة الإشباع الضوئية العالية [1-6].

يوجد العديد من الأبحاث التي اهتمت بدراسة مضخمات رامان متعددة المضخات وذلك لزيادة سعة أنظمة WDM أو DWDM من خلال زيادة عرض الحزمة وتسطح الربح لمضخم رامان.

في المرجع [7] تم تصميم مضخم رامان باستخدام عدة مضخات ليزيرية وصلت إلى 12 مضخة بأطوال موجة تتراوح بين 1412.5nm-1504.5nm وتم الحصول على تموج ربح 2.6dB عبر مجال طول موجة 1527nm-1607nm أي الحزمتين C+L.

وفي البحث [8] تم تصميم مضخم رامان متعدد المضخات ذو 3 مضخات بأطوال موجة بين 1420nm-1480nm فتم الحصول على تسطح ربح 0.1dB مع استخدام تقنية الضخ الخلفي وباستخدام ليف مزاح التشتت DSF بطول 25km وكانت استطاعة الضخ 1W.

بينما تمت دراستنا على مضخم رامان باستخدام ليف وحيد النمط القياسي SMF من أجل أطوال موجة ضخ 1410nm-1520nm لـ 12 مضخة، وتوصلنا إلى عرض حزمة 90nm خلال المجال (1530nm-1620nm)، وتموج ربح 0.4dB و بمتوسط ربح 4.2dB، والنقطة الأهم أن استطاعة الضخ المستهلكة بلغت 600mW لكامل المضخات الليزرية المستخدمة.

كما أجريت دراسة لمضخمات رامان العاملة في مجال الحزمة 1260nm-1360nm O1 وقدم المقال نموذجين لمضخمات رامان المستخدمة في الحزمة O مع نظام CWDM، يملك المضخم الأول عرض حزمة 70nm من أجل الضخ بأربع مضخات ليزيرية ذات أطوال موجية 12xnm، والثاني يملك عرض حزمة 100nm يحتاج 6 مضخات للحصول على ربح مسطح خلال الحزمة O، وبلغ الربح 8.5dB من أجل 11 قناة عند طول موجة 1310nm و 9.5dB من أجل 5 قنوات. [9]

أيضاً اهتم البحث [10] بتقديم دراسة نموذج تحليلي موحد يدرس الربح والتموج في المضخمات المتعددة المضخات وتمت دراسة الربح من أجل 13 مضخة تتراوح أطوال موجاتها بين 1410.8nm-1510.3nm ومجموع استطاعاتها 745mW في ليف SMF بطول 50km وبلغت قيمة الربح حوالي 5.3dB عند طول موجة 1598nm.

جاء بحثنا استكمالاً وامتداداً للأبحاث السابقة والجارية حالياً في هذا المجال من أجل تصميم مضخم رامان متعدد المضخات، واختيار قيم تصميمية جديدة لليف المستخدم وأمواج الضخ المستخدمة لتحقيق تسطح ربح خلال أكبر عرض حزمة ممكن، حيث إن أغلب الأبحاث ركزت على قيمة الربح والتموج، لذا ركزنا خلال هذا البحث على زيادة التسطح وعرض الحزمة.

ركز البحث على دراسة تأثير البارامترات المختلفة من استطاعة الإشارة والمضخة، طول الليف الضوئي المستخدم، طول موجة المضخة، لمضخم رامان على أدائه، وذلك على مجال أطوال موجية بين 1450nm-1650nm، وتم دراسة ومحاكاة طرق الضخ المختلفة (أمامي - خلفي - ثنائي) ومقارنتها، كما تمت دراسة وتحليل تقنية الضخ المتعدد حيث استخدمت n إشارة ضخ بأطوال موجة مختلفة واستطاعات مختلفة، وحقق نموذج المضخم المصمم زيادة في عرض الحزمة وتسطح الربح. نفذت المحاكاة الحاسوبية باستخدام برنامجي MATLAB، OPTISYSTEM.

أهمية البحث وأهدافه:

يعتبر التخمين أحد المشاكل الأساسية في الإرسال الضوئي باستخدام الألياف الضوئية، حيث تعاني الإشارات المرسلية ضمن منظومة الاتصالات من انخفاض قدرتها نتيجة العوامل المختلفة الناتجة عن الليف بحد ذاته وعن التجهيزات الضوئية المستخدمة في النظام، مما يحد من الأداء و من الحصول على سرعة وسعة عالية. من هنا أتت أهمية استخدام المضخم الضوئي كوسيلة لتقليل تخمين الإشارات ولتحسين الأداء، لذا فإن اختيار المضخم الضوئي المناسب سيكون له تأثير كبير على أداء شبكة الاتصالات.

تتجلى أهمية هذا البحث أولاً في تبيان تأثير زيادة عدد المضخات واختيار قيم أطوال موجاتها واستطاعاتها على كل من الربح وعرض الحزمة وتسطح الربح واختيار القيم التي من شأنها زيادة ربح وعرض حزمة المضخم وتسطح الربح، ومن ثم تحسين أداء النظام الضوئي العامل في الحزمة C-Band مع توفير استطاعة الضخ المستهلكة عن طريق الاختيار الدقيق المناسب لهذه القيم، وذلك من خلال الدراسة التحليلية والبرمجة الحاسوبية.

طرائق البحث ومواده

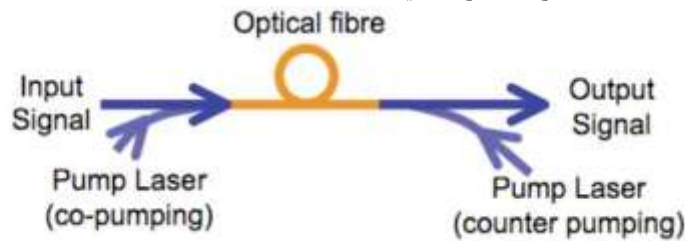
لقد أنجز هذا البحث بالاعتماد على الأسس النظرية والرياضية التي تصف مضخم ليف رامان، كما تم الاعتماد على النمذجة الرسومية وإعداد برنامج حاسوبي باستخدام الحزمة البرمجية MATLABSIMULINK لتمثيل مضخم رامان، وتحديد قيم المعاملات الأساسية للنظام وبارامترات المضخم التي تتعلق بها ربح وعرض حزمة المضخم، ومن ثم مناقشة نتائج الدراسة وصياغة الاستنتاجات.

لمحة عن مضخم رامان (Raman Fiber Amplifier (RFA):

مضخم رامان هو عبارة عن ليف ضوئي غير مشاب، ويتم خلاله نقل الطاقة للإشارة الضوئية عن طريق عملية ضوئية غير خطية تعرف بتأثير رامان (Raman effect) [11-13].

يتكون مضخم رامان من مضخة ذات موجة مستمرة تحقق في الليف البصري لتضخيم إشارة ذات موجة مستمرة غير معدلة. يمكن أن تكون جهة انتشار إشارة الضخ من جهة إشارة قناة المعلومات نفسها هذا ما يسمى بالضخ الأمامي،

أما إذا كانت جهة انتشار الضخ بعكس جهة انتشار إشارة المعلومات فيكون الضخ خلفي، ويمكن أن يكون الضخ بالاتجاهين معا عندئذ يوصف الضخ بالضخ ثنائي الاتجاه [14,15].



الشكل (1) مضخات رامان الليفية

تقدم مضخات رامان طريقة فعالة لإنقاص الضجيج البصري والتأثيرات غير الخطية الناتجة في وسط النقل. والميزة الأساسية لمضخات رامان هي أن طيف الريح عريض جدا وشكل هذا الطيف يتغير بتغير عدد المضخات وأطوال موجاتها [11]. تعتمد مضخات رامان على انتقال الاستطاعة من إشارات الضخ إلى الإشارات الحاملة للمعلومات نتيجة تبعثر رامان المحفز والذي يحدث عندما تكون استطاعة إشارة المضخة ذات مستوى كاف، حيث يوجد نوعان من تبعثر رامان: تبعثر رامان المحفز (SRS stimulated Raman scattering) الذي يمثل النظرية الأساسية للتضخيم، وتبعثر رامان التلقائي للمضخم الذي يقود إلى زيادة الضجيج في النظام [14,15].

يعتبر الإصدار المحفز مصدر للريح في مضخم رامان، أما إذا كان الفوتونات ناتجة عن الإصدار التلقائي للمضخم، يمكن عندها لهذا التبعثر أن يسبب الضجيج التلقائي للمضخم Amplified Spontaneous Emission

(ASE) [5]. تعطى علاقة ربح مضخم رامان بالنسبة لتغير طول ليف التضخيم $G(L)$ كما يلي: [6, 11-15]

$$G(L) = \exp(g * pp0 * leff - as * l) \quad (1)$$

يمكن أن يعبر عن المعادلة السابقة (1) بشكل بسيط بالمعادلة التالية :

$$G(L) = 4.343 * (g * ppo * leff - as * l) \quad (2)$$

حيث g كفاءة ربح رامان، وتعطى بالعلاقة:

$$g \approx \frac{\gamma_R}{A_{eff}} \quad (3)$$

A_{eff} السطح الفعال لقلب الليف، γ_R : معامل الريح، α_s : الضياع الأساسي لليف عند طول موجة الإشارة $[\frac{dB}{km}]$ ، ppo : استطاعة المضخة، α_p : الضياع الأساسي لليف عند طول موجة المضخة $[\frac{dB}{km}]$ ، α_l : خسارة الليف عند طول موجة إشارة القناة $[\frac{1}{km}]$ ، α_l : خسارة الليف عند طول موجة إشارة المضخة $[\frac{1}{km}]$ ، L : هو طول الليف.

$Leff$: هو طول ليف رامان الفعال، ويعطى بالعلاقة التالية :

$$leff = \frac{1 - \exp[-\alpha_p l]}{\alpha_p} \quad (4)$$

النتائج والمناقشة:

1- دراسة ربح مضخم رامان باستخدام الليف الضوئي وحيد النمط Single Mode Fiber (SMF):

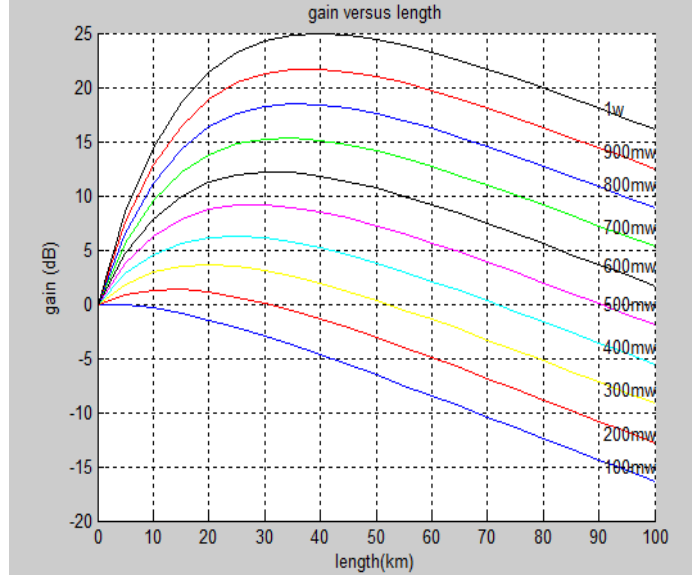
تمت دراسة أداء مضخم رامان باستخدام ليف وحيد النمط SMF الأكثر شيوعاً في شبكات الاتصالات، والهدف من هذه الدراسة تبيان تأثير بارامترات هذا المضخم على أداء عمله، حيث اهتمت معظم الابحاث بدراسة قيم الريح والتسطح واختيار القيم التي تساعد في تقليل مجموع استطاعة الضخ المستهلكة، في حين كان تركيزنا في دراستنا على تحسين

تسطح الربح وعرض الحزمة وليس على نوعية الليف المستخدم وبالتالي قيمة الربح. ومن الجدير ذكره أن المساحة الفعالة Aeff لليف SMF كبيرة، وهذا ما يفسر انخفاض قيمة الربح في نتائجنا. تم اختيار إشارة المضخة بطول موجة 1450nm والإشارة المرسله بطول موجة 1550nm بفارق ترددي $\Delta\nu = 13.2$ [THz] أي بفارق طول موجي 100nm، وذلك للحصول على أعظم كفاءة لربح رامان. يبين الشكل (2) مقارنة أداء المضخم من أجل قيم مختلفة لاستطاعة المضخة في حالة الضخ الأمامي، آخذين بالاعتبار الربح الأمثل، وطول الليف الأمثل.

تم نمذجة العلاقة (2) باستخدام برنامج الماتلاب بالاعتماد على البارامترات التالية:

الجدول (1) البارامترات المستخدمة لنمذجة مضخم رامان:

Pp(pump power)	(100/200/300/400/500/600/700/800/900/1000)mw
as(attenation signal)	0.20 dB/km
ap(attenation pump)	0.263 dB/km
Aeff	82 μm^2
l(length fiber)	100km
ps(pump signal)	0.0001w



الشكل (2) يمثل العلاقة بين ربح مضخم رامان ذو مضخة واحدة

و طول الليف الضوئي عند طول موجة ضخ 1450nm

نلاحظ من الشكل (2) الذي يمثل تغير الربح مع زيادة طول الليف من أجل استطاعات ضخ مختلفة، عدم وجود أي عملية تضخيم عند استخدام استطاعة ضخ قليلة (100mW-300mW)، و عند استخدام استطاعات ضخ متوسطة (400mW-600mW) يقدم مضخم رامان ربح اعلى بقليل مقارنة بالحالة السابقة، ومع زيادة استطاعات الضخ إلى قيم عالية (700mW-1W)، يزداد تضخيم مضخم رامان بشكل واضح. بالنتيجة تزداد قيم الربح كلما زادت كل من قيمة استطاعة الضخ، وطول الليف حتى طول معين وبعده يبدأ الربح بالانخفاض مع زيادة طول الليف بسبب تأثير التخميد على طول الليف.

لاحظنا سابقاً من العلاقة (2) أن ربح مضخم رامان يزداد إما بتخفيض قيمة المساحة الفعالة لليف وهذا يعني تغيير نوع الليف الضوئي المستخدم، أو زيادة استطاعة الضخ، وهذا غير مناسب في الاتصالات بشكل عام كونه يزيد من الكلفة فهو غير اقتصادي، لذا من الضروري اختيار قيم البارامترات المختلفة لعملية التضخيم بدقة و اختيار طريقة

الضخ المناسبة للحصول على أعلى ربح ممكن وأفضل أداء، لذا تم اختبار طرق الضخ المختلفة (الضخ الأمامي والخلفي والتثائي) من أجل استطاعات ضخ مختلفة وتأثيرها على ربح المضخم، كما تمت دراسة حالة الضخ المتعدد باستخدام عدة مضخات.

2- دراسة ربح رامان في حالات الضخ المختلفة:

تمت نمذجة العلاقات التي تمثل الربح في حالات الضخ الأمامي والخلفي والتثائي الممثلة بالمعادلات (5) (6) (1) باستخدام برنامج MATLAB، وبالاعتماد على البارامترات المذكورة بالجدول السابق (1)، حصلنا على المنحنيات المبينة بالأشكال (4,5).

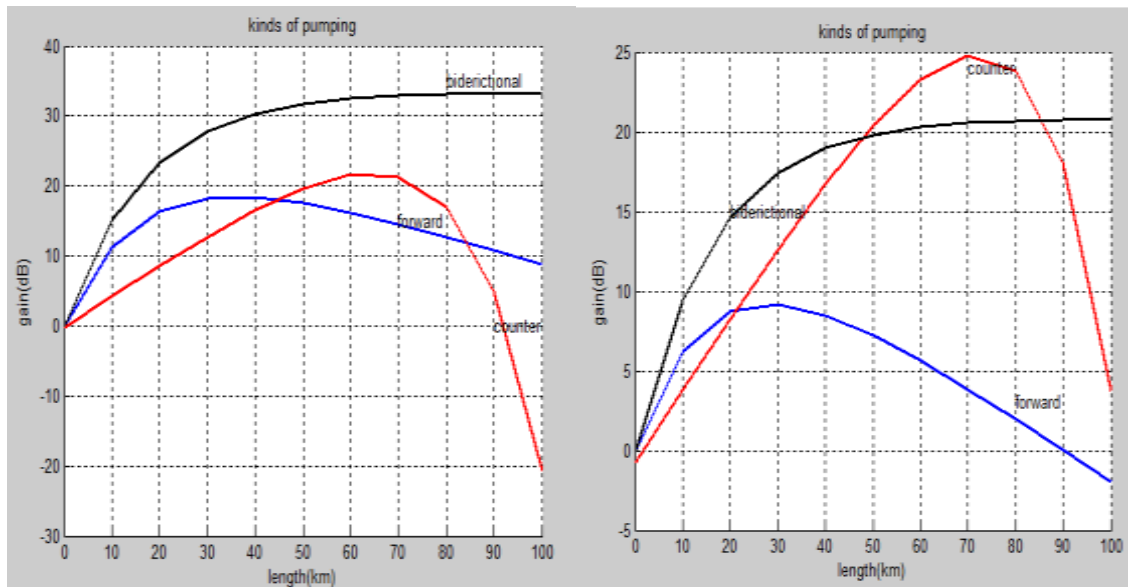
تعطى معادلة ربح المضخم في حالة الضخ الخلفي بالعلاقة: [6,11-15]

$$GR(z) = \frac{\exp(\gamma_R p p_0 l_{eff})}{\exp(\frac{\gamma_R p p_0}{\alpha l_p})} \times \exp\left(\frac{-\gamma_R p p_0}{\alpha l_p} \exp(-\alpha l_p (l-z) - \alpha l_s z)\right) \quad (5)$$

وفي حالة الضخ التثائي:

$$GR(z) = \frac{ps(z) \text{ with pump on}}{ps(0) \text{ with pump off}} = \exp\left(s \times \gamma_R \times p p_0 \times l_{eff} - \alpha l_s x\right) + p_{s0} \exp\left[(1-s) \times \gamma_R \times p p_0 \times \frac{\exp(-\alpha l_p (l-x)) - \exp(-\alpha l_p l)}{\alpha l_p} - \alpha l_s x\right] \quad (6)$$

s النسبة المئوية لطاقة المضخة المدخلة بالاتجاه الأمامي و x القابلية الخطية في الليف المستخدم.



الشكل (3) الربح من أجل أنواع الضخ في مضخم رامان ذو مضخة الشكل (4) الربح من أجل أنواع الضخ في مضخم رامان ذو مضخة واحدة عند استطاعة ضخ 500mW وطول موجة 1450nm واحدة عند استطاعة ضخ 800mW وطول موجة 1450nm

استناداً إلى المنحنيات في الشكل السابق (3) التي تمثل تغير الربح مع زيادة طول الليف الضوئي من أجل طرق الضخ المختلفة باستطاعة ضخ 500mW، وعند المقارنة بين أنواع الضخ المختلفة مع أطوال الليف المختلفة. لاحظنا أن قيم الربح في الضخ التثائي أكبر من قيم الربح في الضخ الأمامي والخلفي مع زيادة طول الليف حتى 50km، وبعدها يصبح الربح أعلى في حالة الضخ الخلفي، ثم يعود هذا الربح للانخفاض من أجل طول أكبر من 90km، حيث نلاحظ في حالة الضخ الأمامي والخلفي يزداد الربح مع زيادة الطول حتى طول معين بعدها يبدأ

بالتناقص مع زيادة طول الليف، وهذا يحدث بسبب عدم كفاية الانعكاس السكاني عند طول معين نتيجة استهلاك كبير لاستطاعة المضخة على طول الليف وزيادة الخسارة نتيجة الفقد الناجم عن كامل الإشارات لتفوق الريح الناتج، بينما في الضخ الثنائي تزداد قيمة الريح مع زيادة الطول وتثبت تقريباً عند قيمة ثابتة بعد طول 40km. نلاحظ من الشكل السابق (4) الذي يمثل تغير الريح مع زيادة طول الليف الضوئي من أجل طرق الضخ المختلفة باستطاعة ضخ 800mW، زيادة قيم الريح بشكل واضح عند ازدياد قيمة استطاعة الضخ في حالات الضخ الثنائي والأمامي، على عكس حالة الضخ الخلفي حيث تكون قيم الريح أعلى عند استخدام استطاعة ضخ صغيرة، كما يصبح الريح ثابتاً تقريباً في حالة الضخ الثنائي بعد طول محدد لليف، وذلك حسب البارامترات المستخدمة ووفقاً للعلاقات الرياضية (5)، (6) التي تعطي قيمة الريح. بينما تنخفض قيم الريح مع ازدياد طول الليف بشكل كبير بسبب زيادة التخميم في حالات الضخ الأمامي والخلفي.

3- دراسة مضخم رامان متعدد المضخات:

تهدف هذه الدراسة كما ذكر سابقاً إلى دراسة وتحسين أداء مضخم رامان بتخفيض تموج طيف الريح في شبكات الاتصالات ذات التجميع بتقسيم طول الموجة والناتج بسبب الطبيعة غير البلورية لمادة السيليكا حيث إن معامل ربح مضخم رامان يتبع للإزاحة الترددية الفاصلة بين طول موجة الإشارة وطول موجة المضخة وبالتالي ينتج عن ذلك عدم تساوي للريح أو عدم تسطح لطيف الريح وهذا ما يسمى بالتموج، وتم تحديد العدد اللازم من المضخات الليزرية وتحديد أطوال موجاتها واستطاعاتها اللازمة لتحقيق التحسين.

حيث إن طيف ربح رامان من أجل مضخة واحدة يكون مسطحاً فقط لبضعة نانو متر، ومن الممكن توسيع طيف الريح و زيادة تسطحه باستخدام عدة مضخات ضوئية بأطوال موجة واستطاعات مختلفة عند اختيارها بشكل دقيق، بحيث تولد كل مضخة طيف ربح وينتج عن تراكب هذه الأطياف ربح ثابت عبر مجال طيفي عريض، وذلك باختيار دقيق لأطوال موجات المضخات ولاستطاعاتها [16-19].

يحسب ربح كل قناة باستخدام العلاقة :

$$G = 10 \log_{10} \frac{p_s(L)}{p_s(0)} \quad (7)$$

ويحسب الريح المتوسط بالعلاقة

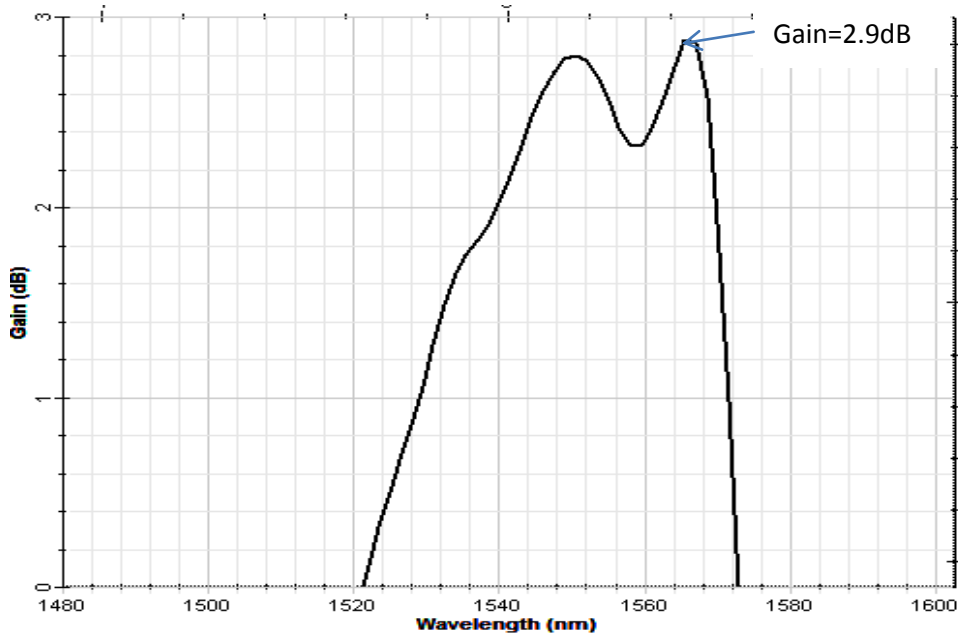
$$G_{average} = \sum_{n=1}^N \frac{G_n}{N} \quad (8)$$

تمثل n رقم القناة، G_n ربح القناة، و N عدد قنوات المعلومات ويحسب تموج الريح بالعلاقة :

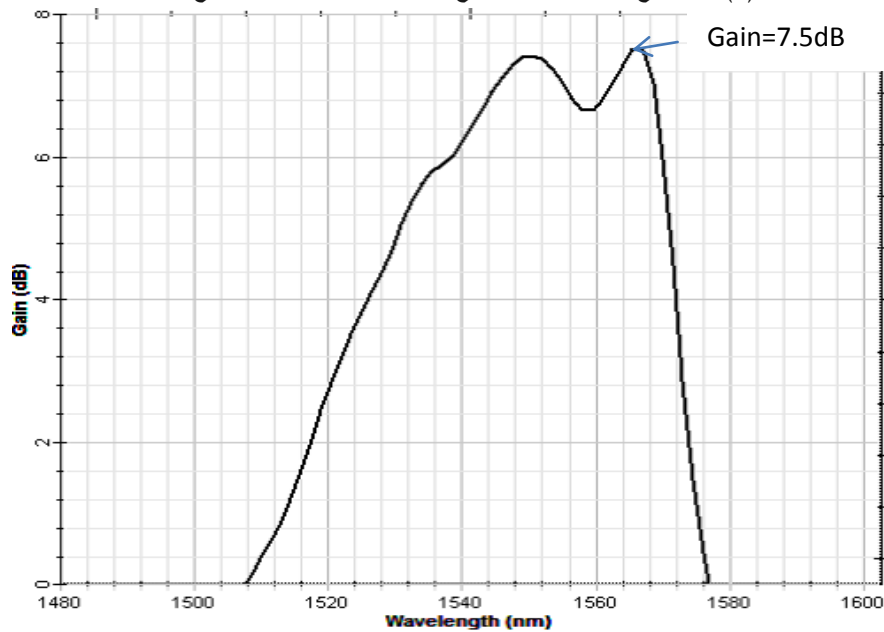
$$G_{ripple} = \frac{G_{max} - G_{min}}{2} \quad (9)$$

G_{max} , G_{min} هما أعظم ربح وأدنى ربح في طيف الريح الناتج.

تمت دراسة الريح عندما يتم الضخ في الاتجاه الخلفي في حالة الحزمة C من أجل 47 قناة دخل ضوئية تمتد أطوال موجتها من 1520nm حتى 1620nm، بفواصل طول موجة 2.13nm، واستطاعة (10μW) 20dBm- لكل قناة دخل وطول الليف الضوئي المستخدم 25km. أجريت المحاكاة باستخدام برنامج Optisystem، حيث تم تنفيذ مخطط المحاكاة من أجل المضخم المصمم مع اختيار قيمة طول موجة المضخة $\lambda_p=1450nm$ ، واستطاعتها (300, 400, 500, 600, 700, 800)mW واختبار أداء المضخم من أجل هذه القيم التي اختيرها بعد تجريب مجموعة من القيم، وتم الحصول على مخطط طيف الريح كما في الأشكال التالية:



الشكل (5) طيف ربح رامان من أجل الضخ بمضخة واحدة باستطاعة ضخ 300mW

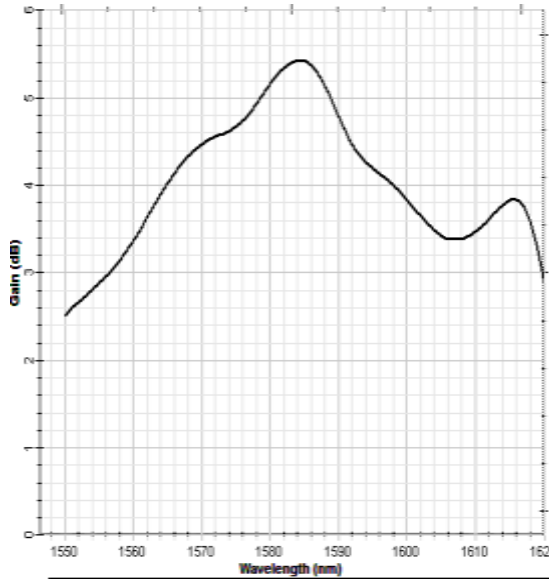


الشكل (6) طيف ربح رامان من أجل الضخ بمضخة واحدة باستطاعة ضخ 600mW

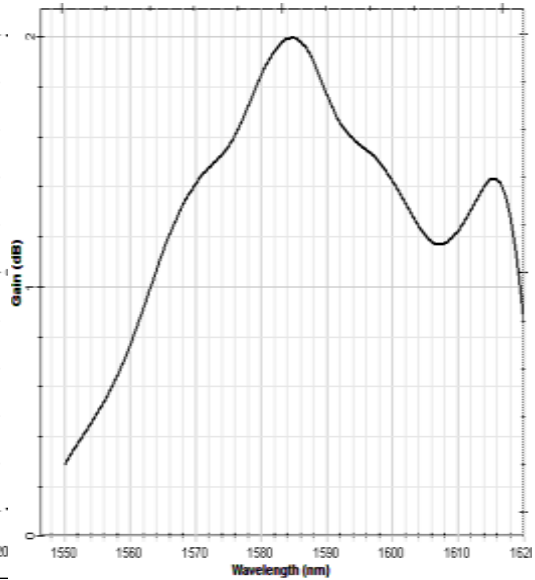
يمثل الشكلين (5) و(6) طيف الربح من أجل الضخ باستطاعات 300mW، 600mW على الترتيب، ونلاحظ أنه باستخدام مضخة واحدة طول موجتها 1450nm ومن أجل استطاعات ضخ مختلفة، يتم التضخيم على مجال 70nm دون تسطح بالربح، وتزداد قيم الربح كلما زادت استطاعة الضخ. تم اختبار حالة استخدام مضختين ومن أجل قناة دخل ضوئية بأطوال موجية بين 1520nm و1620nm بفاصل موجي 2.13nm واستطاعة -20dBm لكل قناة دخل وطول الليف 25km، وتم اعتماد الضخ الخلفي لمضخم رامان، حيث ان اطوال موجة واستطاعات المضخات التي استخدمت مذكورة في الجدول أدناه.

الجدول (2): أطوال موجات الضخ واستطاعاتها:

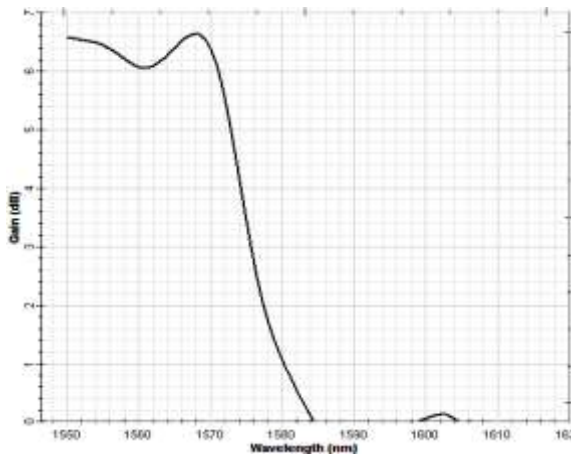
استطاعة الضخ Pp (mw)	طول موجة الضخ λ_p (nm)	استطاعة الضخ Pp (mw)	طول موجة الضخ λ_p (nm)
100	1410	80	1465
450	1460	190	1492
550		270	الاستطاعة الكلية
100	1410	200	1465
350	1460	300	1492
450		500	الاستطاعة الكلية
90	1426	238.9	1422.4
190	1454	435.2	1451.9
280		674.1	الاستطاعة الكلية



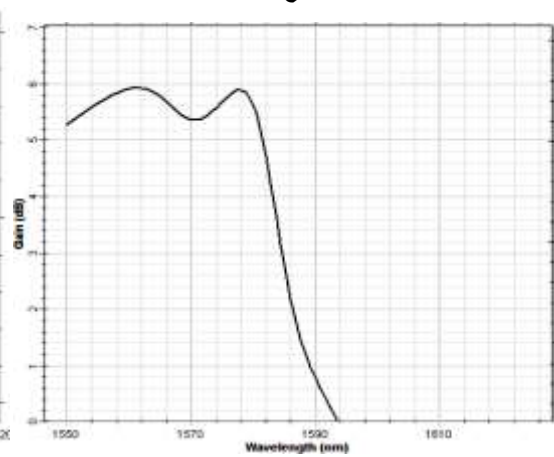
الشكل (7-B): طيف ربح مضخم رامان ذو مضختين عند استطاعة دخل 500mW



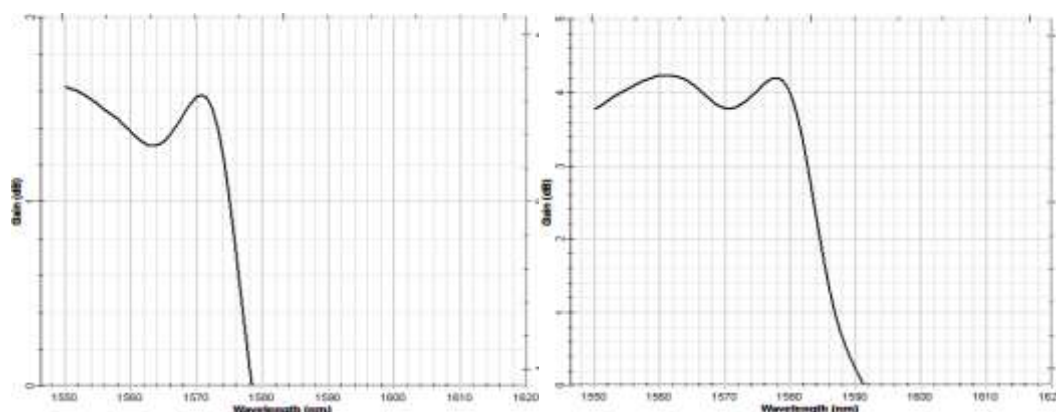
الشكل (7-A): طيف ربح مضخم رامان ذو مضختين عند استطاعة ضخ كلية 270mw



الشكل (7-D): طيف ربح مضخم رامان ذو مضختين عند استطاعة دخل 550mW



الشكل (7-C): طيف ربح مضخم رامان ذو مضختين عند استطاعة ضخ كلية 674.1mw



الشكل (7-F): طيف ربح مضخم رامان ذو مضختين

عند استطاعة ضخ كلية 280mW

الشكل (7-E): طيف ربح مضخم رامان ذو مضختين

عند استطاعة ضخ كلية 450mw

تمثل مجموعة الأشكال (7) طيف ربح مضخم رامان من أجل الضخ بمضختين بقيم استطاعة ضخ إجمالية مختلفة، بالنتيجة لاحظنا زيادة الربح مع تزايد استطاعة الضخ، و إن طول موجة الضخ يؤثر على عرض مجال التضخيم، كما لاحظنا انه باستخدام مضختين لم يتم الحصول على ربح مسطح لأكثر من 20nm. والجدول التالي يمثل قيم الربح وتموج الربح (الذي يحسب من العلاقة (9)) وعرض الحزمة الناتجة من اجل قيم مختلفة لاستطاعة الضخ:

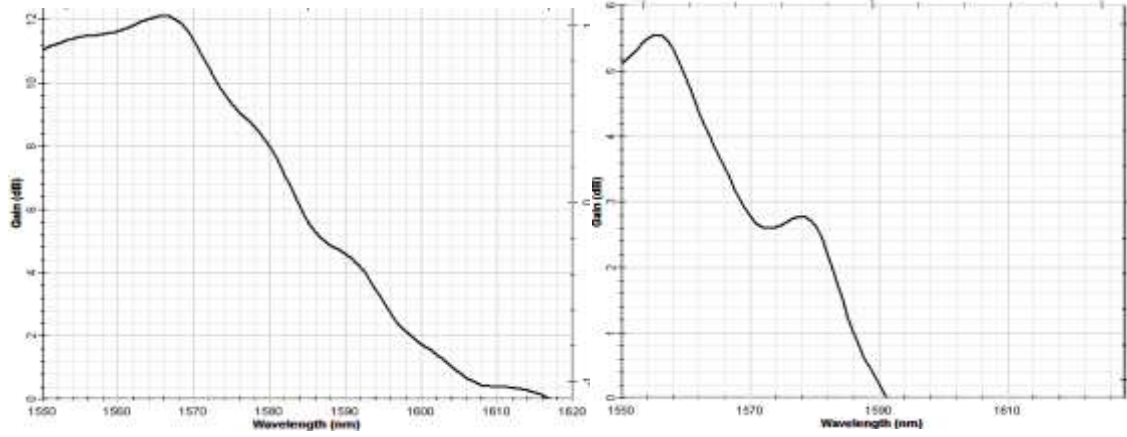
الجدول (3): ربح المضخم وعرض الحزمة وتموج الربح من اجل قيم مختلفة لاستطاعة وطول موجة الضخ:

أطوال موجتي الضخ [nm]	استطاعة ضخ إجمالية	الربح [dB]	عرض حزمة الربح [nm]	تموج الربح [dB]
1465, 1492	270	1.1	70	1.8
1465, 1492	500	4	70	1.5
1422.4, 1451.9	674.1	6.3	20	0.6
1410, 1460	550	5.6	30	0.8
1460, 1410	450	4	30	0.4
1454, 1426	280	1.4	20	0.4

كررت الدراسة باستخدام 3 مضخات بفاصل طول موجة 2.13nm، مع الحفاظ على قيم باقي البارامترات، حيث كانت أطوال موجات الضخ واستطاعاتها كما هو مبين بالجدول أدناه:

الجدول (4): أطوال موجات الضخ واستطاعاتها:

طول موجة المضخة λ_p (nm)	استطاعة الضخ للمضخة Pp (mw)	طول موجة المضخة λ_p (nm)	استطاعة الضخ للمضخة Pp (mw)
1420	200	1450	400
1440	200	1460	300
1460	200	1470	200
استطاعة ضخ كلية	600	استطاعة ضخ كلية	900



الشكل (8-B) طيف ربح المضخم باستخدام 3 مضخات
باستطاعة ضخ إجمالية 900mW

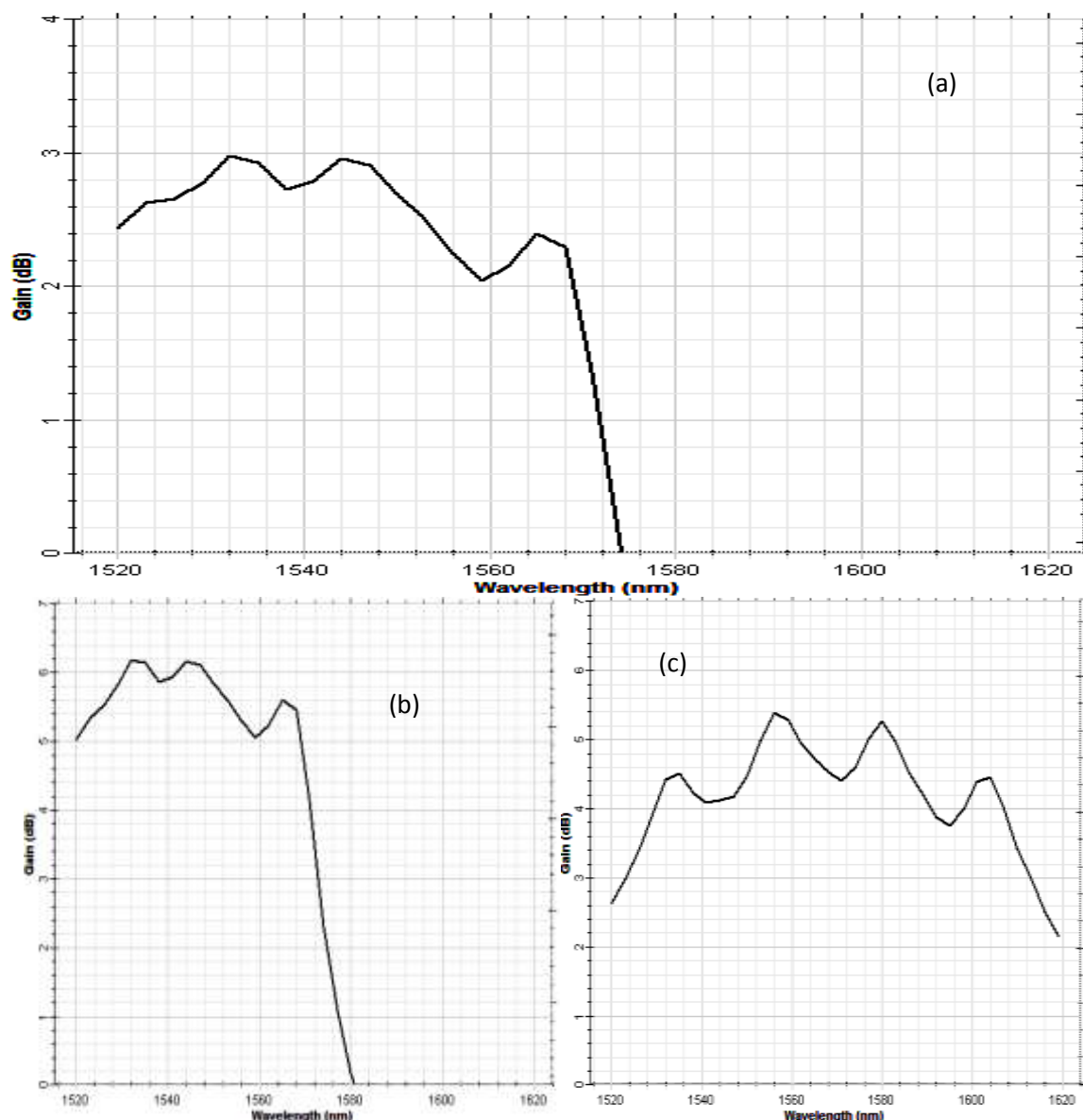
الشكل (8-A) طيف ربح المضخم باستخدام 3 مضخات
باستطاعة ضخ إجمالية 600mW

نلاحظ عند استخدام ثلاث مضخات بفروق أطوال موجة ضخ 20nm واستخدام نفس استطاعة الضخ 200mw وباستطاعة ضخ إجمالية 600mW تم التضخيم على مجال 30nm كما هو مبين في الشكل (8-A).
و عند استخدام ثلاث مضخات بفروق أطوال موجة ضخ 10nm وباستطاعة ضخ إجمالية 900mw تم التضخيم على مجال 60nm كما يوضح الشكل (8-B).
تم اختبار حالة استخدام 6 مضخات ودراسة تأثيرها على طيف ربح المضخم، حيث درست المضخات ذات المواصفات المذكورة بالجدول أدناه:

الجدول (5): أطوال موجات الضخ واستطاعاتها:

استطاعة الضخ للمضخة Pp (mw)	طول موجة المضخة λ_p (nm)	//عدد المضخات//
50, 60, 50, 70, 60, 50	1410- 1470	
340		الاستطاعة الكلية
60, 70, 50, 40, 50, 100	1410-1470	
370		الاستطاعة الكلية
50, 100, 70, 80, 100, 70	1410-1470	
470		الاستطاعة الكلية
200, 150, 120, 100, 50, 40	1420, 1440, 1460, 1480, 1500, 1520	
660		الاستطاعة الكلية

نتيجة المحاكاة حصلنا على المنحنيات كما في الأشكال التالية:



الشكل (9): (a) طيف الريح من أجل الضخ ب 6 مضخات باستطاعة ضخ إجمالية 340mW، (b) استطاعة ضخ إجمالية 470mW، (c) استطاعة الضخ 660mW.

باستخدام 6 مضخات تبدأ أطوالها الموجية اعتباراً من 1410nm و بفاصل طول موجي 10nm مع استخدام استطاعة ضخ إجمالية 340mW يتم التضخيم على مجال 50nm مع قيمة تموج بالريح تصل إلى 1dB وبمتوسط ربح يصل إلى 2.5dB.

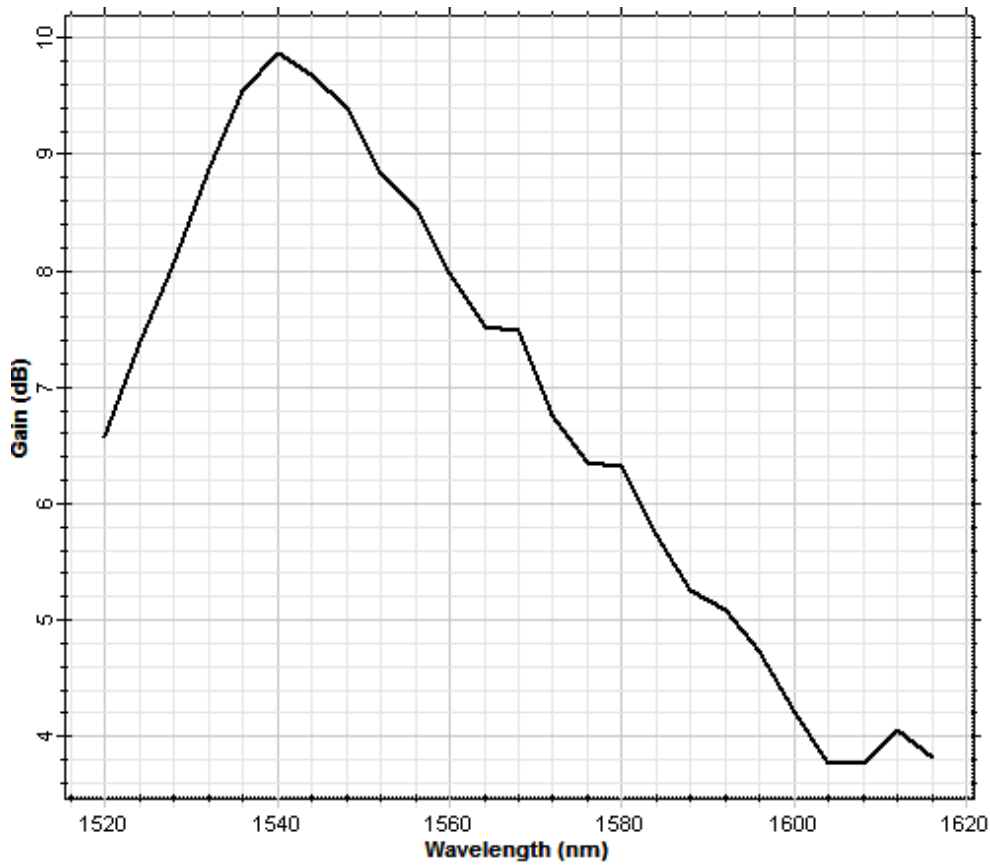
باستخدام نفس الأطوال الموجية السابقة مع زيادة استطاعة الضخ لتصبح 370mW يتم التضخيم على مجال 50nm وبقية تموج للريح تصل إلى 0.6dB، وبمتوسط ربح يصل إلى 2.3dB، وعند زيادة استطاعة الضخ الإجمالية إلى 470mW يتم التضخيم على مجال 50nm وبقية تموج للريح تصل إلى 1.1dB وبمتوسط ربح يصل إلى 5.55dB.

باستخدام أطوال موجية للضخ تبدأ من 1420nm حتى 1520nm بفاصل طول موجة 20nm واستطاعة ضخ إجمالية 660mW يتم التضخيم على مجال 100nm بدون تسطح بالريح.

تمت زيادة عدد المضخات إلى 8 مضخات بأطوال موجية عشوائية وباستطاعة إجمالية 585mW، فتم الحصول على تضخيم على مجال 100nm من عرض الحزمة العاملة، لكن دون تسطح بالريح، كما هو واضح فيمنحنى طيف الريح في الشكل (10). حيث أن المضخات التي استخدمت في الدراسة كان لها الأطوال الموجية والاستطاعات المذكورة بالجدول أدناه:

الجدول (6): أطوال موجات الضخ واستطاعاتها:

طول الموجة [nm]	استطاعة الضخ [mW]	طول الموجة [nm]	استطاعة الضخ [mW]
1425	125	1461	65
1432.5	105	1472	34.5
1440	105	1489	34
1450	82.5	1508	34



الشكل (10) طيف ربح المضخم من أجل الضخ ب 8 مضخات باستطاعة ضخ إجمالية 585mW

دراسة حالة الضخ ب 12 مضخة:

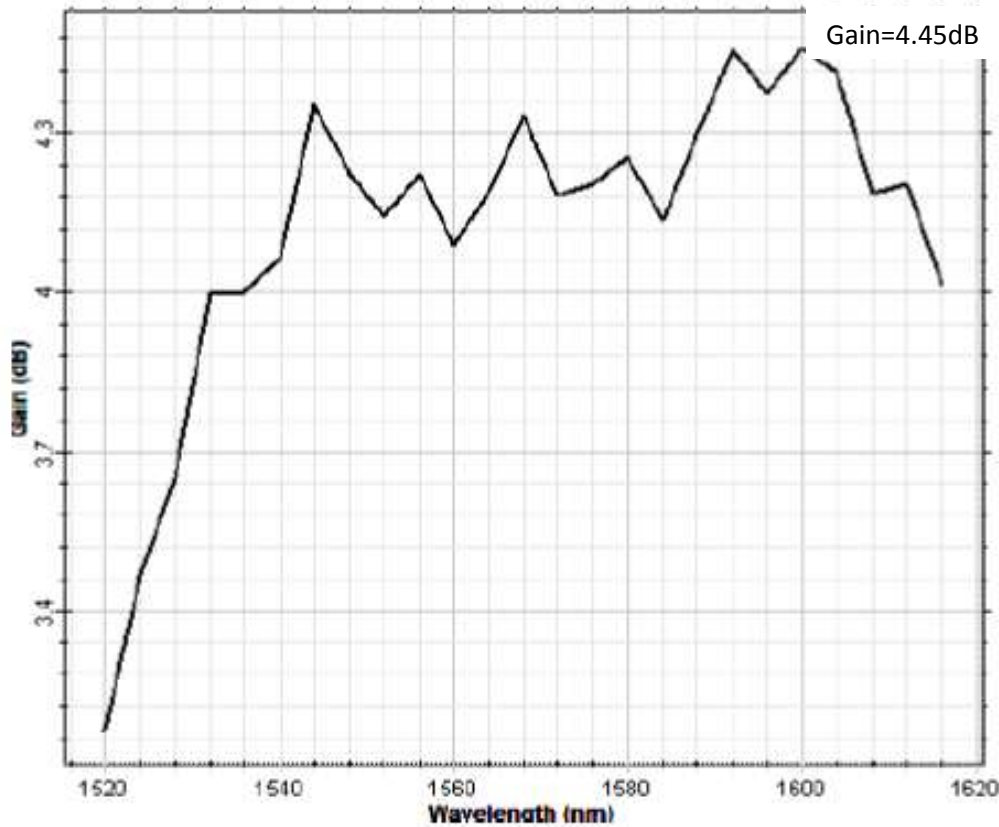
تابعنا خلال هذا البحث اختبار تأثير أعداد مختلفة للمضخات على أداء المضخم حتى وصلنا إلى 12 مضخة، حيث أجريت المحاكاة اعتماداً على البارامترات التالية:

25 قناة دخل ضوئية تمتد أطوالها الموجية من 1520nm حتى 1620nm وبفاصل موجي 4nm واستطاعة كل قناة دخل 20dBm وطول ليف 25km، كما تم اعتماد الضخ الخلفي لمضخم رامان.

حيث إن المضخات المستخدمة تملك الأطوال الموجية والاستطاعات التالية كما هو مبين بالجدول:

الجدول (9) أطوال موجات الضخ واستطاعاتها:

عدد المضخات	λ_p (nm)	Pp (mW)
12	1410-1520	95, 98, 95, 52, 55, 39, 38, 25, 30, 20, 25, 28
الاستطاعة الكلية		600



الشكل (11) طيف ربح مضخم رامان ذو 12 مضخة عند استطاعة ضخ إجمالية 600mW

باستخدام 12 مضخة ليزيرية بحيث أن الفروق الموجية لأطوال موجة الضخ 10nm وباستطاعات ضخ عشوائية واستطاعة ضخ إجمالية 600mW باختيار مناسب لقيم بارامترات الـ 12 مضخة، نحصل على ربح مسطح على مجال 90nm ويتموج ربح 0.4dB و ربح 4.45dB.

الاستنتاجات والتوصيات:

- 1- تزداد قيم الربح كلما زادت كل من قيمة استطاعة الضخ وطول الليف حتى طول معين وبعده يبدأ الربح بالانخفاض مع زيادة طول الليف بسبب تأثير التخميد على طول الليف.
- 2- إن قيم الربح في الضخ الثنائي أكبر من قيم الربح في الضخ الأمامي والضح الخلفي، حيث نلاحظ في حالة الضخ الأمامي والخلفي يزداد الربح مع زيادة الطول حتى طول معين بعدها يبدأ بالتناقص مع زيادة طول الليف، بينما في الضخ الثنائي تزداد قيمة الربح مع زيادة الطول وتثبت تقريباً عند قيمة ثابتة بعد طول 40km.
- 3- باستخدام مضخة واحدة طول موجتها 1450nm ومن أجل استطاعات ضخ مختلفة، يتم التضخيم على مجال 70nm دون تسطح بالربح، وتزداد قيم الربح كلما زادت استطاعة الضخ.

- 4- إن طول موجة الضخ يؤثر على عرض مجال التضخيم، كما لاحظنا انه باستخدام مضختين لم يتم الحصول على ربح مسطح لأكثر من 20nm، وباستخدام 6 مضخات تبدأ أطوالها الموجية اعتباراً من 1410nm مع استخدام استطاعة ضخ إجمالية 340mW يتم التضخيم على مجال 50nm مع قيمة تموج بالربح تصل إلى 1dB وبمتوسط ربح يصل إلى 2.5dB.
- 5- باستخدام نفس الأطوال الموجية السابقة مع زيادة استطاعة الضخ لتصبح 370mW يتم التضخيم على مجال 50nm وبقية تموج للربح تصل إلى 0.6dB، وبمتوسط ربح 2.3dB، وعند زيادة استطاعة الضخ الإجمالية إلى 470mW يتم التضخيم على مجال 50nm وبقية تموج للربح تصل إلى 1.1dB وبمتوسط ربح 5.55dB.
- 6- باستخدام أطوال موجية للضخ تبدأ من 1420nm حتى 1520nm بفاصل طول موجة 20nm واستطاعة ضخ إجمالية 660mW يتم التضخيم على مجال 100nm بدون تسطح بالربح.
- 7- زيادة عدد المضخات إلى 8 مضخات بأطوال موجية عشوائية وباستطاعة إجمالية 585mW تم الحصول على تضخيم على مجال 100nm من عرض الحزمة العاملة لكن دون تسطح بالربح.
- 8- باستخدام 12 مضخة ليزيرية واستطاعة ضخ إجمالية مخفضة مقارنة مع الدراسات الأخرى تبلغ 600mW وذلك باختيار مناسب لقيم بارامترات الـ 12 مضخة، حصلنا على ربح مسطح وبتموج ربح 0.4dB وبمتوسط ربح 4.45dB مناسب للشبكات الضوئية ويعرض حزمة 90nm مما يزيد من سعة هذه الشبكات، في حين انه في دراسات سابقة تم التوصل الى تموج ربح اعلى بلغ 2.6dB باستخدام 12 مضخة خلال مجال اطوال موجية 80nm، كما وصلت إحدى الدراسات الى تموج ربح 0.1dB لكن كانت استطاعة الضخ المستخدمة مرتفعة 1W.

المراجع:

- [1] ARWA H. ;BESHR MOUSTAFA H.; ALYAND A.; ABOULSEOD,K.. *Different Pump Configurations for Discrete Raman Amplifier*” International Journal of Scientific & Engineering Research, Egypt, Vol. 2, Issue 11, November-2011.
- [2] ER. MANINDER; KUMAR DUGGAL; ER. GURPREET BHARTI. *Raman Effect for Gain Flattening in an Optical Communication System*, International Journal of Engineering and Management Research, Vol.4, Issue-1, February-2014.
- [3] AHMED NABIH ZAKI RASHED, *Forward Pumping Based Fiber Optical Raman Amplifiers in Different Optical Fiber Transmission Medium Systems*, Egypt, International Electrical Engineering Journal (IEEJ) Vol. 4, No. 1, 2013, pp. 838-845.
- [4] KIBOI BOIYO, D.; KUJA, S.; ROTICH KIPNOO, E.K.; WASWA, D, *Modeling of an Optical Fiber Raman Amplifier*, Proceedings of the Mechanical Engineering Conference on Sustainable Research and Innovation, Vol. 4, May 2012.
- [5] ANUPAM SAHU, SACHIN KUMAR GUPTA, AND VIJAY RAO KUMBHARE, *Effect of ASE on Raman Gain in 800nm band* , Kuala Lumpur (Malaysia), th Int'l Conference on Advances in Engineering Sciences and Applied Mathematics (ICAESAM'2016) Dec., 2016. 21-22.
- [6] CLIFFORD, H, C; AGRAWAL, P, G. *Raman Amplification in Fiber Optical Communication Systems*. Elsevier Academic Press, USA, 2005,383.
- [7] NAMIKI, S., EMORI,Y.. *Ultrabroad- band Raman amplifiers pumped and gain-equalized by wavelength-division multiplexed high-power laser diodes*. IEEE J. Sel. Topics in Quant. Electr. 7(1), 3–16 (2001).

- [8] ANIA-CASTAÑÓN, J. D.; PUSTOVSKIKH, A. A. *Simple design method for gain-flattened three-pump Raman amplifiers*. Springer Science+ Business Media, Opt Quant Electron (2007) 39:213–220, 2007.
- [9] SAITO A, L.A.M.; TAVEIRAA, P.D., GAARDE B, P.B.; *Multi-pump discrete Raman amplifier for CWDM system in the O-band*. Published by Elsevier, Optical Fiber Technology, 294–298, 14 (2008).
- [10] THIAGO V. N. COELHO, A. BESSA DOS SANTOS, MARCO A. JUCÁ, LUIZ C. C. JR., A., *correction method for the analytical model in Raman amplifiers systems based on energy conservation assumption*, Journal of Microwaves, Optoelectronics and Electromagnetic Applications, Vol. 15, No. 3, 198-209, September 2016.
- [11] RASMUS, K. *Raman amplification in optical communication systems*. Technical University of Denmark, Denmark, 2008,161.
- [12] YUHONG, K. *Calculations and Measurements of Raman Gain Coefficients of Different Fiber Types*. Blacksburg, Virginia,2002
- [13] K.X. LIU, E. GARMIRE, *Understanding the formation of the SRS stokes spectrum in fused silica fibers*, IEEE J. Quantum .Electron. 1991,1022–1030.
- [14] SHIRLEY P.; NEVES C.; LUIZ DE C.; CALMON, M., *An Analytical Approximated Solution for the Gain of Broadband Raman Amplifiers With Multiple Counter-Pumps*, Journal of Lightwave Technology, Vol. 27, No. 7, 2009.
- [15] AHMED H. TOEIMA, MOUSTAFA H. ALY, *Gain and Noise Performance of Fiber Raman Amplifiers*, Egypt, Technology and Maritime Transport, 2009, 27-28.
- [16] SAITO, L. A. M.; TAVEIRA,P. D.; GAARDE,P. B.; DE SOUZA K.; AND DE SOUZA, E. A., *Multi-pump discrete Raman amplifier for CWDM system in the O-band*, Fortaleza-CE, Brazil, VI International Telecommunications Symposium, 2006, 3-6.
- [17] WOJASWI SAHU1 D.; SONI CH., *Gain Analysis of Fiber Raman Amplifier for Single Signal and Multiple Pump*, IJSRD - International Journal for Scientific Research & Development/ Vol. 3, Issue 08, 2015 / ISSN (online): 2321-0613.
- [18] CASTELLANI, C, E; CANI, S, P; SEGATTO, M, E. *Numerical comparison between conventional dispersion compensating fibers and photonic crystal fibers as lumped Raman amplifiers*. Optical Society of America, USA, Vol. 17, No. 25, 2009.
- [19] ABD EL-NASER A. MOHAMMED1, ABD EL-FATTAH A. SAAD2, AHMED N., *Characteristics of Multi Pumped Raman Amplifiers in Dense Wavelength Division Multiplexing (DWDM) Optical Access Networks*, Egypt, IJCSNS International Journal Of Computer Science And Network Security, Vol.9, No.2, February 2009.