

دراسة تأثير التعديل الطوري المتبادل اللاخطي على أداء المضخم الليفي المشاب بالإربيوم EDFA

م. نغم عباس *

(تاريخ الإيداع ٢٠٢٣/٣/٣٠ . قُبل للنشر في ٢٠٢٣/٨/٧)

□ ملخص □

هدفت هذه الدراسة إلى تطوير نموذج رياضي لمضخم ليفي مشاب بالإربيوم EDFA يأخذ بالحسبان تأثيرات كير Kerr اللاخطية والتي لها تأثير هام على أداء المضخم الضوئي، حيث تلعب التأثيرات اللاخطية دور هام عند انتشار الضوء ضمن الليف الضوئي بسبب التفاعل اللاخطي خلال مقطع قصير في بداية الليف عند العمل بمعدلات إرسال مرتفعة في نظام التجميع DWDM حيث يكون المجال الفاصل بين القنوات متقارب، من بين هذه التأثيرات تأثير تعديل الطور الذاتي SPM الذي يمكن أن يتواجد في الأنظمة وحيدة القناة، تأثير مزج الموجات الأربعة FWM، والتعديل الطوري المتبادل XPM التي تتواجد فقط في الأنظمة المتعددة القنوات، ويعد تأثير XPM الأكثر سلبية وتأثيراً في مضخم EDFA من بين هذه التأثيرات. لذلك تم في هذا البحث اختبار سلوك المضخم بوجود تأثير XPM، من أجل مجال واسع من قيم استطاعة الضخ، استطاعة الإشارة، طول المضخم وغيرها. وقد أثبت اختبار النموذج المطور أنه من الممكن اختيار القيم التصميمية الأفضل التي تعطي أفضل نتائج من حيث قيمة الربح، ضجيج الإصدار التلقائي ASE وذلك بعد إجراء اختبار على مجال واسع من القيم.

الكلمات المفتاحية: المضخم الليفي المشاب بالإربيوم EDFA، التعديل الطوري المتبادل، تأثيرات كير اللاخطية.

* مشرف على الأعمال قسم هندسة الاتصالات - كلية الهندسة الميكانيكية والكهربائية والالكترونيات-جامعة تشرين- اللاذقية- سورية.

Studying The Effect of Nonlinear Cross Phase Modulation on Erbium Doped Fiber Amplifier Performance

Eng. NAGHAM ABBAS*

(Received 30/3/2023 . Accepted 7/8/2023)

□ ABSTRACT

This study aimed to develop a model of an erbium-doped fiber amplifier EDFA, that takes into account the nonlinear Kerr effects, which have an important effect on the performance of the optical amplifier due to the nonlinear interaction during a short segment at the beginning of the fiber when working at high transmission rates in the DWDM system, where the interval between channels is small, among these effects are the effect of SPM that can be found in single-channel systems, the effect of four-wave mixing FWM, and cross-phase modulation (XPM) that can only be found in multi-channel systems. The effect of XPM is the most negative and influential in EDFA amplifier. Therefore, in this paper we investigated the behavior of EDFA in the presence of the XPM effect along this amplifier, for a wide range of values of pumping power, signal power, EDFA length and others. The test of the developed model that it is possible to choose the best design values that give the best results in terms of gain value, and ASE noise, for a wide range of values.

Key Word: Erbium Doped Fiber Amplifier EDFA, XPM, Nonlinear Kerr Effect.

* Technical Member, Departement of Communication and Electronics, Faculty of mechanical and electrical engineering, Tishreen University, Lattakia, Syria.

١-المقدمة:

كان الاهتمام سابقاً بالتأثيرات اللاخطية في المضخم الليفي المشاب بالارييوم (Erbium Doped (EDFA) Fiber Amplifier) محدود جداً، وأهملت في معظم الأبحاث والدراسات وذلك لأن طول المضخم من مرتبة بضعة عشرات الامتار خاصة عند عمل المضخم في الحزمة C-Band، ولكن نظراً لأن مضخم EDFA يصنع بقلب صغير وفرق كبير بين قرينة انكسار القلب والغلاف فهذا يؤدي إلى مساحة فعالة أصغر وقرينة انكسار لاخطية كبيرة، ولذا تلعب اللاخطية دور هام في الليف الضوئي عند العمل بمعدلات إرسال مرتفعة في نظام التجميع بتقسيم طول الموجة الكثيف (Dense Wavelength Division Multiplexing (DWDM)) حيث يكون عدد القنوات المرسله كبير والفاصل بين القنوات صغير. [1,2]

قسمت هذه التأثيرات إلى تأثيرات مرنة وغير مرنة، حيث إن التأثيرات اللامرنة هي تأثير تبعثر رامان المحفز (Stimulated Raman Scattering SRS)، وتبعثر بريلوين المحفز (Stimulated Brillouin cattering SBS)، والتأثيرات المرنة تعتمد على قرينة الانكسار اللاخطية وتسمى تأثيرات Kerr ومنها مزج الموجات الأربع (Four Wave Mixing FWM)، التعديل الطوري المتبادل (Cross Phase Modulation XPM)، التعديل الطوري الذاتي (Self Phase Modulation SPM)، من بين هذه التأثيرات يعتبر تأثير FWM، XPM الأكثر سلبية وتأثيراً في مضخم EDFA. [1,2-4]

تحدث الظواهر الكهرومغناطيسية اللاخطية بشكل أساسي نتيجة لكون استجابة الوسط العازل تابع لاخطي لمطال كل من الحقلين الكهربائي والمغناطيسي. فعندما تزداد شدة الأمواج الكهرومغناطيسية تبدي استجابة الوسط العازل سلوك لاخطي ومنشأ هذه اللاخطية يعود إلى الحركة الاهتزازية للإلكترونات عند تطبيق حقل عالي. وبالنتيجة تبدأ التفاعلات اللاخطية بين الضوء وليف السيليكا عندما تستخدم الاستطاعات العالية. أي استجابة المادة العازلة للضوء تصبح لاخطية من أجل الحقول الكهرومغناطيسية القوية. [5]

تطلبت الاستراتيجيات المتبعة للحد من التأثيرات اللاخطية غير المرغوبة الحد من السويات العالية للاستطاعة الضوئية المرسله، لكن هذا الإجراء سبب انخفاض موافق في نسبة استطاعة الإشارة إلى استطاعة الضجيج، وهذا ما دعا إلى البحث عن خيارات أخرى ودراسة المعاملات المؤثرة على هذه التأثيرات واختيارها بدقة. [6]

بدأ الاهتمام بهذه التأثيرات في أواخر تسعينيات القرن الماضي وأوائل الألفية الثانية في البداية كانت دراسات تجريبية ونظرية حول تأثير اللاخطية على الإشارة في مضخم EDFA. أظهرت الدراسات التجريبية أن XPM في EDFA من المرجح أنه يسبب إعاقة هامة في أداء نظم WDM وهو مماثل في أهمية تأثيره مع ذلك الناتج في ليف الإرسال. وفي الوقت نفسه، فإن الريح سيضخم شدة التداخل الناجم عن XPM في EDFA، وفي عام ٢٠٠٣ كان هناك دراسة تطرقت إلى دراسة تأثير XPM في نموذج مضخم EDFA وبينت تأثير عامل اللاخطية، طول المضخم واستطاعة المضخة على سلوك ربح المضخم. في حين إن الدراسات الأقدم اهتمت بالإزاحة الطورية والانحراف الترددي الناتج عن XPM وتأثيرها في عامل الأداء Q ومعدل خطأ البت BER للنظام المتضمن مضخم EDFA. [1, 7, 8]

جميع هذه الدراسات اعتمدت محاكي OPTISIM أو كانت دراسات تجريبية درست أداء النظام من حيث bit error rate BER، Q factor وتضمنت بعض نتائجها عرض لتغيرات XPM بال dB مع طول الموجة واستطاعة الدخل واختبرت من أجل تشكيلات مختلفة للمضخم، كما تم الحصول على علاقة Composite Triple Carrier to Noise Ratio CNR، Beat CTB، Composite Second Order CSO بالاستطاعة المستقبلية وريح مضخم رامان من أجل تشكيلات وصل

تسلسلية مختلفة. لم تدرس هذه الأبحاث تأثير اللاخطية XPM على الريح بوجود ضجيج Amplified spontaneous emission ASE بالاعتماد على برنامج ماتلاب والذي يتميز بمرونة كافية لدراسة الخصائص الفيزيائية للمضخم من أجل تشكيلات ضخ مختلفة.

لذا ونظراً لأهمية دراسة سلوك المضخم الضوئي EDFA بوجود تأثير XPM تم في هذا البحث استنتاج نموذج رياضي لدراسة التأثيرات اللاخطية في مضخم EDFA ودراسة تأثيرها في خصائص المضخم.

٢- أهمية البحث وأهدافه:

تتبع الأهمية العلمية للدراسة من الحاجة لعرض حزمة ضخم وسعة إرسال كبيرة يتطلبها النمو الهائل في الانترنت وحركة المعطيات لدفع عجلة تطور أنظمة الاتصالات الحديثة في السنوات القليلة الماضية والحالية، ولذا تم تطوير أنظمة التجميع بتقسيم طول الموجة تلبية لتلك المتطلبات ووصلت سعة الإرسال حتى مرتبة التيرا بت في الثانية إضافة إلى تطوير مضخم EDFA الذي يعزز أداء نظام WDM من أجل الشبكات الضوئية طويلة المسافة، لكن ترافق تطوير الشبكات الضوئية مع ظهور بعض المشكلات حيث إن مضخم EDFA نفسه يسبب بعض السلبات التي تصنف في نوعين وهي التأثيرات الخطية واللاخطية. لذا من هنا أتت أهمية هذا البحث الذي تضمن استنتاج نموذج رياضي لدراسة تأثير XPM اللاخطي في مضخم EDFA و تقييم أدائه.

٣- طرائق البحث ومواده:

نظراً لتعقيد وتكلفة تركيب الشبكات الضوئية أصبح إجراء التجارب عبر النمذجة والمحاكاة غاية في الأهمية حتى في المجال التعليمي والاكاديمي في المعاهد والجامعات التقنية. لذا أنجز هذا البحث استناداً إلى الأسس النظرية والرياضية التي تصف مضخم EDFA، وبالاعتماد على النمذجة وإعداد برنامج حاسوبي باستخدام MATLAB لتمثيل مضخم EDFA باستخدام خوارزمية Splicing Method، وتحديد قيم المعاملات الأساسية وبارامترات المضخم التي تتعلق بها ربحه بوجود تأثيرات ضجيج ASE و XPM اللاخطي، ومن ثم مناقشة نتائج الدراسة وصياغة الاستنتاجات.

٣-١- دراسة رياضية للنموذج الرياضي لمضخم EDFA:

يوصف النموذج الرياضي لمضخم EDFA باستخدام معادلات المعدل Rate Equations، التي هي معادلات تفاضلية لاخطية تصف تغير نسبة حوامل الشحنة واستقرارها مع الزمن، ومعادلات الانتشار Propagation Equation التي تصف تغير استطاعة الإشارة والمضخة على طول المضخم [9]. حيث يمكن تحديد N_1, N_2 اعتماداً على معادلات المعدل التالية [10, 11]:

$$\frac{dN_1}{dt} = -\Gamma_{21}N_2 - (N_1 - N_3)\phi_P\sigma_P + (N_2 - N_1)\phi_S\sigma_S \quad (1)$$

$$\frac{dN_2}{dt} = -\Gamma_{21}N_2 + \Gamma_{32}N_3 - (N_2 - N_1)\phi_S\sigma_S \quad (2)$$

$$\frac{dN_3}{dt} = -\Gamma_{32}N_3 + (N_1 - N_3)\phi_P\sigma_P \quad (3)$$

Γ_{32} : احتمال الانتقال من السوية ٣ إلى السوية ٢، ϕ_P : استطاعة تدفق المضخة المؤثرة (عدد الفوتونات لكل وحدة زمنية لكل وحدة مساحة)، ϕ_S : استطاعة تدفق الإشارة المؤثرة (عدد الفوتونات لكل وحدة زمنية لكل وحدة مساحة).

$$N_2(z) = \frac{\frac{\tau\sigma_s^a\Gamma_s P_S(z) + \tau\sigma_p^a\Gamma_p P_P(z)}{h\vartheta_{sA}}}{\frac{\tau(\sigma_s^e + \sigma_s^a)\Gamma_s P_S(z) + \tau(\sigma_p^e + \sigma_p^a)\Gamma_p P_P(z)}{h\vartheta_{pA}}} N \quad (4)$$

$$N_1 = N - N_2$$

A: المقطع الفعال للقلب، τ : زمن حياة ذرات الإربيوم في السوية اللاستقرارية METASTABLE.

ϑ_p, ϑ_s الترددات الضوئية للإشارة والمضخة.

وتصف معادلات الانتشار تفاعلات الإشارة مع الأيونات الموجودة في الوسط المضيف (الليف الضوئي) أثناء

انتشار حقول الإشارة والمضخة وتمثل تغير استطاعة الإشارة وتغير استطاعة المضخة التي تعطى كما يلي [12]:

$$\frac{dP_P}{dz} = -\sigma_P\Gamma_{13}N_1P_P - \gamma_P P_P \quad (5)$$

$$\frac{dP_S}{dz} = -\sigma_S\Gamma_{12}N_1P_S + \sigma_S\Gamma_{21}N_2P_S - \gamma_S P_S \quad (6)$$

γ : عامل التبخر ومصادر الضجيج الأخرى في المضخم، Γ_{21} : احتمال الانتقال من السوية ٢ إلى السوية

١، Γ_{12} احتمال انتقال ذرات الإربيوم Er^{+3} من السوية ١ إلى ٢، يرمز σ_P إلى المقطع العرضي الامتصاصي

للمضخة من أجل الانتقال بين السوية ١ إلى السوية ٣ و يرمز σ_S إلى المقطع العرضي للانبعاثات من أجل الانتقال

بين السوية ٢ إلى السوية ١.

٣-٢- طريقة Splicing Method:

تم استخدام طريقة Splicing Method لنمذجة وتحليل مضخم EDFA مع الأخذ بالحسبان تأثير ضجيج

ASE، وتأثير أهم البارامترات كطول المضخم، استطاعة وطول موجة المضخة، استطاعة الإشارة المرسله في الدخل،

وكثافة تركيز أيونات الإربيوم. وتمكننا بواسطة هذا التحليل من تقييم وتحديد مجال القيم الأفضل لبارامترات هذا المضخم

للحصول على أفضل ربح وأقل ضجيج ASE. [13]

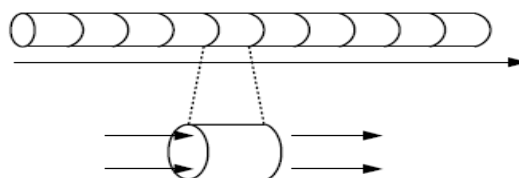
٣-٢-١- استخدام طريقة Splicing Method لنمذجة مضخم EDFA:

يعتمد حل نموذج مضخم EDFA على تقسيمه إلى مقاطع صغيرة متماثلة حيث تكون كثافة ذرات

الإربيوم Er^{+3} في كل جزء في السوية الأرضية $N_1(z)$ واللاستقرارية (metastable) $N_2(z)$ ثابتة، واعتبار

مضخم EDFA كسلسلة من المضخمات الموصولة على التسلسل وكل منها بطول dz ، كما هو مبين في الشكل (1)

[13, 14]



الشكل (1) مضخم EDFA ممثلاً بسلسلة مقاطع متسلسلة للربح

وذلك وفقاً لطريقة splicing method ومن ثم تنفيذها باستخدام برنامج MATLAB والتي تتضمن الخطوات

التالية:

١- اعتبار كثافة ذرات الإربيوم في السويتين الأرضية والعليا N_1, N_2 ثابتة لا تتغير من أجل

كل مقطع.

٢- يحدد الربح وعامل ضياع المضخة في ليف السيليكا وفق المعادلات التالية:

$$g(z) = \Gamma_s [\sigma_{es} N_2(z) - \sigma_{as} N_1(z)] \quad (7)$$

$$\alpha_p(z) = \Gamma_p [\sigma_{ep} N_2(z) - \sigma_{ap} N_1(z)] \quad (8)$$

Γ : عامل التقاطع (التداخل) Overlap بين الحقل الضوئي الساقط وتوزع أيون الإربيوم المعروف سابقاً. يعطي عامل التقاطع وفق المعادلة:

$$\Gamma = (1 - e^{-R^2/\omega^2}) \quad (9)$$

R : نصف قطر توزع ذرات الإربيوم، ω : حجم البقعة *spot size* التي تحدد بالعلاقة:

$$\omega = \frac{a}{\sqrt{2}} \left(0.65 + \frac{1.619}{V^{1.5}} + \frac{2.879}{V^6} \right) \quad (10)$$

a : نصف قطر القلب لليف و V التردد المقيس لليف، σ_e, σ_a المقاطع العرضية للامتصاص والإصدار ويمثلان القدرة على إنتاج الريح والقدرة على الامتصاص والانبعث للإشارة والمضخة، وهي تعتمد على نوع المضخم EDFA وطول الموجة.

٣- يتم افتراض حجم المقطع (الخطوة) dz ومن ثم يحسب عدد المقاطع بالعلاقة $Nz = L/dz$.

٤- تحدد أبعاد مصفوفة قيم N_1, N_2 بحجم عدد المقاطع المدروسة والمحددة سابقاً.

٥- يتم اسناد القيم النموذجية للثوابت والبارامترات المميزة للمضخم والليف المستخدم وتضمن هذه القيم

في ملف *m-file* حيث يتم انشاء تابع لإيجاد الريح وضجيج ASE.

٦- حساب N_2 من أجل كل خطوة dz على كامل طول المضخم مع الأخذ بالحسبان تأثير ASE، ثم

حساب N_1 .

٧- حساب الاستطاعات P_s, P_p, P_{ase} بلا dBm.

٨- في هذه الخطوة يتم حساب معادلات الانتشار التفاضلية من أجل استطاعة المضخة واستطاعة

الإشارة واستطاعة ASE المعطاة بالمعادلات السابقة.

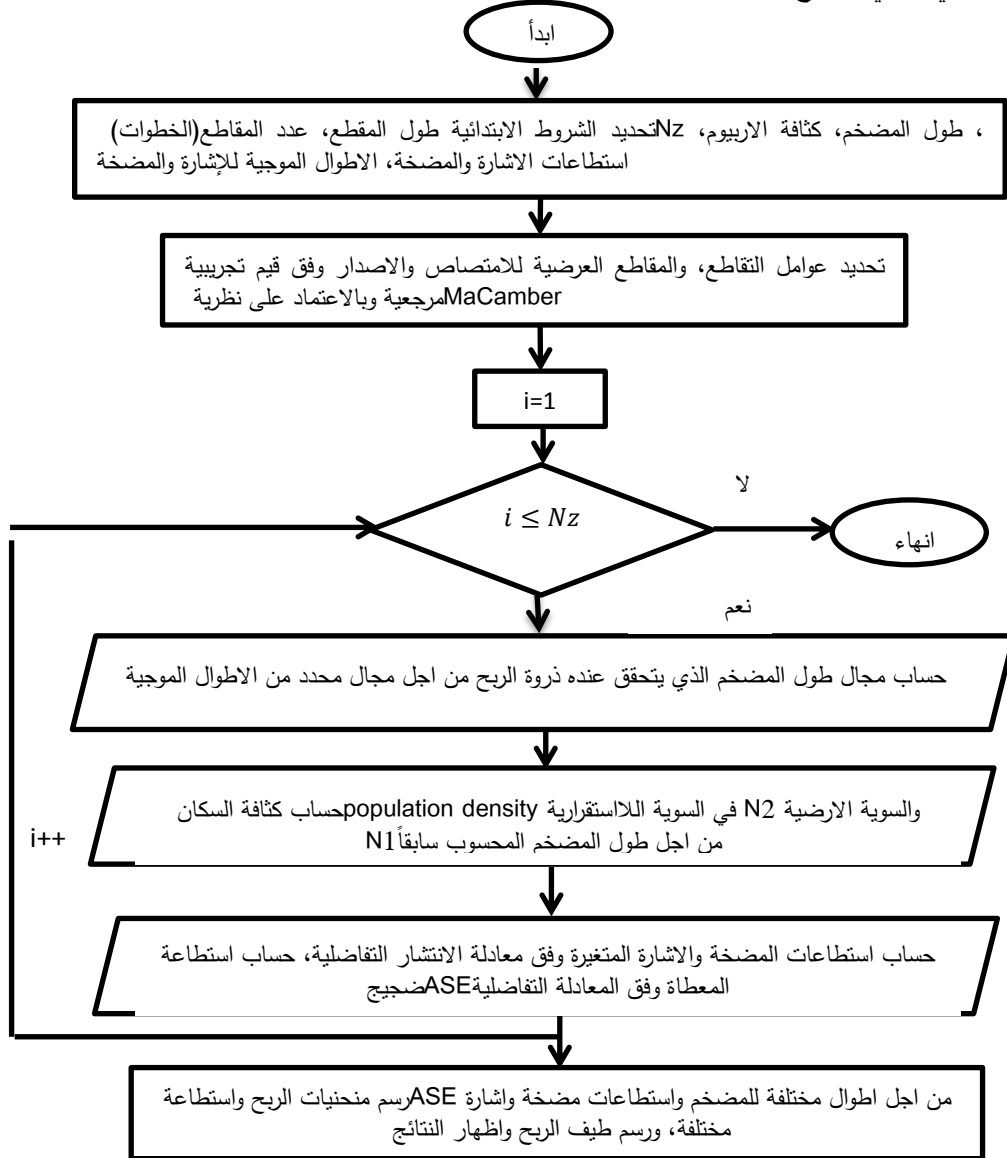
٩- إنشاء ملف آخر *m-file* يتم من خلاله استدعاء التابع السابق واستنتاج قيم الريح واستطاعة ASE

ورسم المنحنيات البيانية. ويعطى ربح المضخم بشكل عام على كامل الطول L وفق المعادلة:

$$G[dB] = 10 \log_{10} \frac{P_{out}}{P_{in}} \quad (11)$$

إن مجموع المعادلات السابقة من (1) حتى (11) تبين أن ربح المضخم غير ثابت على طول ليف المضخم، ويعتمد على البارامترات المادية والبنوية للمضخم EDF (مقاطع عرضية للامتصاص والانبعاثات، السطح الفعال، نصف قطر التوزيع Er^{+3} ...)، طول الليف، طول موجة المضخة، طول موجة الإشارة، استطاعة الإشارة، واستطاعة المضخة.

والمخطط التدفقي التالي يوضح عملية نمذجة مضخم EDFA وفق خوارزمية Splicing Method:



الشكل (٢) المخطط التدفقي للنموذج الرياضي لمضخم EDFA

تمت معالجة كل مرحلة بمعادلاتها المنفصلة بحيث طبقناها برمجياً في برنامج MATLAB معتمدين على حلقات for التكرارية لمحاكاة ولمواكبة التغيرات التي تتعرض لها الإشارة خلال عبورها لأجزاء المضخم EDFA. ومن ثم ترجمنا الحل التحليلي لمعادلات الانتشار التفاضلية إلى كود برمجي للحصول على قيم الاستطاعات المتغيرة على طول المضخم. أخذين بالحسبان جميع البارامترات المميزة للمضخم EDFA من أطوال موجة، استطاعة المضخة

والإشارة، طول المضخم، تركيز أيونات الإربيوم، زمن حياة الأيونات في السويات الطاقية، عوامل التقاطع للإشارة والمضخة، المقاطع العرضية للانبعاث والامتصاص، نصف قطر المضخم، ومساحة فعالة للقلب. فيما يلي نقدم جدول يوضح قيم البارامترات الأساسية المؤثرة في عمل هذا المضخم والقيم النموذجية لها المعتمدة في أغلب الدراسات والتي طبقناها للتأكد من صحة النموذج المدروس.

جدول (1) البارامترات المستخدمة والتي تخص مضخم EDFA [15-17]:

Γ_S	٠.٦٩٤	λ_p	980nm
Γ_P	٠.٨٨٥	σ_a	$2.58e-25$ m^2
N	$10^{25}[1/m^3]$	σ_e	$0.7e-25$ m^2
τ_a	10ms	P_{ASE}	-40[dBm]
L	1-100m	P_p	5-100[mW]
Psat	20dBm	P_{in}	-80:50 [dBm]
λ_s	1550nm	α	0.25[dB/km]

تم نمذجة المضخم كنظام ثنائي المستوى، وهذا يعني أن $N_1 + N_2 = N_t$ ، حيث N_1 كثافة الذرات في السوية الأرضية، N_2 كثافة الذرات في السوية اللاستقرارية Metastable، و N_t كثافة الذرات الكلية في قلب ليف EDFA، وبناء عليه تم التوصل إلى نتائج تحدد تأثيرات البارامترات المختلفة على أداء هذا المضخم. بعد أن تمت محاكاة هذا المضخم باستخدام MATLAB أتاحت لنا مرونة كافية لدراسة كافة قيم البارامترات المدروسة واختبار أداءه عندها.

٣-٣- النموذج المعدل لدراسة تأثير XPM اللاخطي:

يستند تعديل نموذج المضخم إلى معادلات المعدل ومعادلات الانتشار أيضاً، مع مراعاة تغيرات الشدة التي تحدثها XPM بين استطاعة المضخة والإشارة. أي تم إضافة تأثير XPM والذي يسبب تغيرات في استطاعة الإشارة كما هو موضح في المعادلات التالية (14-12) من خلال تعديل النموذج الرياضي لمضخم EDFA وذلك بإضافة المعادلة (18) الموضحة أدناه إلى مجموعة معادلات الانتشار بعد أن يتم تعويض الحد P_{XPM} في المعادلة (18) بما يقابلها وفق المعادلة (14)، هذا النهج أكثر بساطة ودقة لدراسة تغيرات الإشارة الناجمة عن XPM في EDFA.

يعطى هنا المطال العقدي للإشارة الجيبية المعدلة (المضخة) عند مسافة Z وفق المعادلة: [1]

$$P_p(z, \omega) = P_p(\omega) \cos\left(\frac{1}{2}\beta_{2p}\omega^2 z\right) e^{(-\alpha z)} e^{\left(\frac{j\omega z}{v_{gp}}\right)} \quad (12)$$

يمثل الحد $\exp(-\alpha z) \cdot \exp\left(\frac{j\omega z}{v_{gp}}\right)$ التخميد وتأخير الانتشار للقناة الثانية اعتباراً من دخل الليف حتى المسافة Z، v_{gp} عبارة عن سرعة المجموعة للقناة ٢، α ، عامل التخميد وعامل التشتت، تبعاً لذلك فإن التعديل الطوري في القناة ١ الناجم عن تأثير XPM والناشيء خلال طول متناهي في الصغر dz عند المسافة Z يعطى بالعلاقة:

$$d\phi_{XPM}(z, \omega) = -2\gamma_S P_p(z, \omega) \quad (13)$$

γ_S معامل الاقتران اللاخطي للموجة ١ (العامل اللاخطي)، طالما أن الإزاحة الطورية الناتجة عن XPM متناهية الصغر يتم اعتماد توصيف الإشارة الصغيرة من أجل تحويل التعديل الطوري إلى تعديل شدة (PM-IM) الناتج عن GVD.

ومن ثم يتم إعطاء تغير استطاعة المتناهي الصغر الناجم عن XPM في مقطع بطول dz على مسافة z بالعلاقة:

$$dP_{XPM}(z, \omega) = -2P_S(\omega) \cdot e^{(-\alpha z)} \cdot e^{(-j\omega z \beta_{2s})} \sin\left(\frac{1}{2}\beta_{2s}z\omega^2\right) d\phi_{XPM}(z, \omega) \quad (14)$$

$\bar{P}_S(0)$ هو متوسط استطاعة القناة ١ في دخل الليف.

بفرض أن أيونات الإربيوم ستفيد ضمن مركز نواة الليف. يوصف تغير استطاعة المضخة بـ P_p حيث P_s للإشارة و P_{ASE} من أجل ضجيج الاصدار التلقائي للمضخم.

وبالاستفادة من المعادلة (14) تم تعديل نموذج مضخم EDFA الموصوف بمجموعة معادلات المعدل والانتشار المستنتجة من المعادلات (6)-(1) حيث تم تعديل تغير الاستطاعات وفق معادلات الانتشار في المضخم EDFA بإضافة المعادلة (18) كما يلي: [6,18,19]

$$\frac{dP_p}{dz} = -\left(\alpha_p \frac{\bar{N}_1}{N_t}\right) P_p - \lambda_p P_p \quad (15)$$

$$\frac{dP_s}{dz} = \left(g_s \frac{\bar{N}_2}{N_t} - \alpha_s \frac{\bar{N}_1}{N_t}\right) P_s - \lambda_s P_s \quad (16)$$

$$\frac{dP_{ASE}}{dz} = \left(g_{ASE} \frac{\bar{N}_2}{N_t} - \alpha_{ASE} \frac{\bar{N}_1}{N_t}\right) P_{ASE} + 2h\nu\Delta\nu g_{ASE} - \lambda_{ASE} P_{ASE} \quad (17)$$

$$\frac{dP_{XPM}}{dz} = \left(g_s \frac{\bar{N}_2}{N_t} - \alpha_s \frac{\bar{N}_1}{N_t}\right) P_{XPM} - \lambda_s P_{XPM} \quad (18)$$

حيث $\alpha(\lambda), g(\lambda)$ هما معاملات الاصدار والامتصاص emission and absorption coefficients، نلاحظ هنا أن المعادلة (18) تتضمن الحد P_{XPM} والذي تم تعويضه بما يقابله وفق المعادلة (14) وهنا جوهر التعديل في نموذج مضخم EDFA والذي يمكن من الأخذ بالحسبان لتأثير XPM في أداء مضخم EDFA.

تم حساب الريح المتعلق بطول الموجة بالعلاقة التالية: [20-22]

$$G(\lambda) = \frac{P_s(L)}{P_s(0)} \quad (19)$$

باستخدام برنامج MATLAB تم اختبار والتحقق من صحة النموذج أولاً بإهمال XPM ومن ثم مع أخذه بالحسبان، وتم الحصول على النتائج التي تمكن من تقييم أداء هذا المضخم. حيث إن MATLAB برنامج بلغة عالية المستوى والأداء بالتالي له أداء عالي في الحسابات والتطبيقات التقنية الهندسية بجميع فروعها والرياضيات والفيزياء وغيرها. هذا البرنامج يسهل تنفيذ الخوارزميات واختبارها مما يبسط تطبيق العمليات الحسابية المعقدة بما فيها حل المعادلات التفاضلية. وبالتالي يبدأ الحل بتحديد المسألة من حيث عدد متغيراتها ومدخلاتها ومخرجاتها المتوقعة والحدود التي لا يجب أن يخرج عنها الحل ثم دراسة هذا الحل عند القيم المختلفة للمعاملات المستخدمة، ودراسة استجابة النظام للتغيير في هذه المعاملات.

مع العلم أن الأبحاث السابقة حول اللاخطية في مضخم EDFA اعتمدت محاكي OPTISIM أو كانت دراسات تجريبية والتي بدأت عام ١٩٩٨، اهتمت بدراسة وتقييم التأثيرات اللاخطية الناتجة في مضخم EDFA من حيث التنبؤ بالإزاحة الطورية التي يسببها تأثير XPM، دراسة شكل النبضة زمنياً عند دخل وخرج مضخم EDF، التأثيرات اللاخطية الممثلة بـ CSO, CTB لتصميم نظام CATV، دراسة تأثير XPM من حيث عامل الأداء Q و BER، قياس الانحراف المعياري في شدة إشارة الخرج بالنسبة إلى متوسط الشدة المختبرة كتابع لفاصل طول الموجة بين الاشارتين.

٤- النتائج والمناقشة:

٤-١- دراسة تأثير طول المضخم على الربح بوجود تأثير XPM:

تمت دراسة تأثير طول المضخم على XPM بالاستعانة بالمعادلات السابقة وباستخدام طريقة Splicing Method بنقسيه الليفي إلى أجزاء فحصلنا على النتائج التالية التي تتضمن علاقة الربح مع طول المضخم بوجود تأثير XPM (المنحني +)، بينما كان منحني ربح المضخم بإهمال XPM (الخط المستمر) من أجل قيم مختلفة لاستطاعة الضخ تتراوح بين (5mW-100mW).

تم اختيار القيم الأولية للبارامترات التصميمية والثوابت الخاصة وفق ما اعتمدته الأبحاث للمضخم، كما هو مبين في الجدول (1)

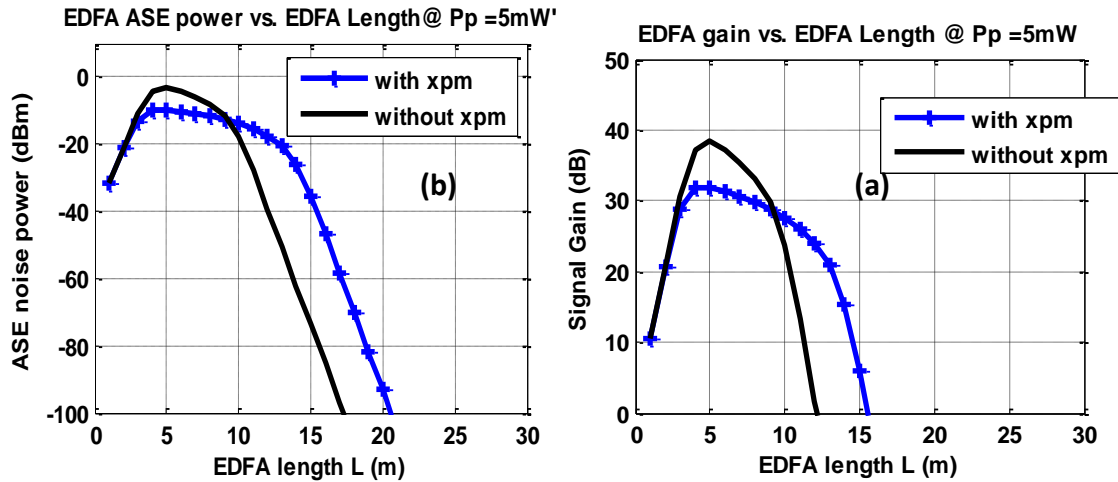
٤-١-١- تغيير الربح عند استطاعة ضخ 5mW:

تم اختبار سلوك المضخم بوجود تأثير XPM على طول المضخم، من أجل مجال واسع من قيم استطاعة الضخ، استطاعة الإشارة وغيرها. وضمنًا هنا بعض النتائج التي توضح تأثير XPM على ربح المضخم وأهميته دراسته وعدم إغفاله، يبين الشكل التالي (3-a) تغيير منحني ربح المضخم مع الطول عند استطاعة دخل -40dBm ومن أجل استطاعة ضخ 5mW حيث لاحظنا:

-زيادة الربح إلى قيمة عظمى 38dB مع زيادة طول المضخم في كلا الحالتين حتى قيمة محددة لطول المضخم (الطول الأمثل) في المجال (4m-10m) ليبدأ بعدها الربح بالتناقص.

-يسبب XPM تناقص الربح عند الطول الأمثل بمقدار 5dB تقريباً مما يعني انخفاض فعالية التضخيم بينما يسبب XPM زيادة الربح بعد الطول الأمثل.

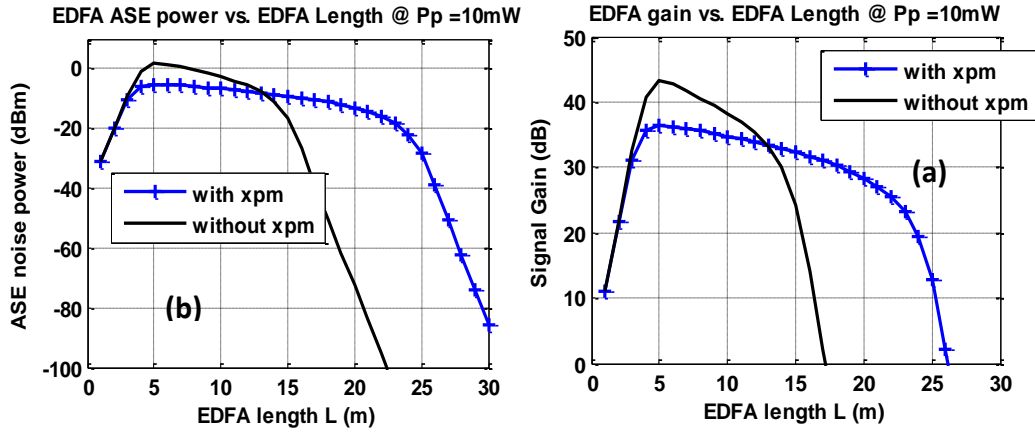
من الشكل (3-b) نلاحظ ان استطاعة ضجيج ASE تبدي نفس الاستجابة (السلوك) كما في حالة الربح حيث يزداد حتى -3dBm ويسبب XPM تناقص في قيمة هذا الضجيج عند الطول الأمثل.



الشكل (3) (a) يبين تغيير ربح المضخم EDFA مع طول المضخم عند استطاعة ضخ 5mW بوجود تأثير XPM (+) وبإهماله (المنحني المستمر)، (b) يبين تغيير استطاعة ASE مع تغيير طول المضخم EDFA

٤-١-٢- عند استطاعة ضخ 10mW:

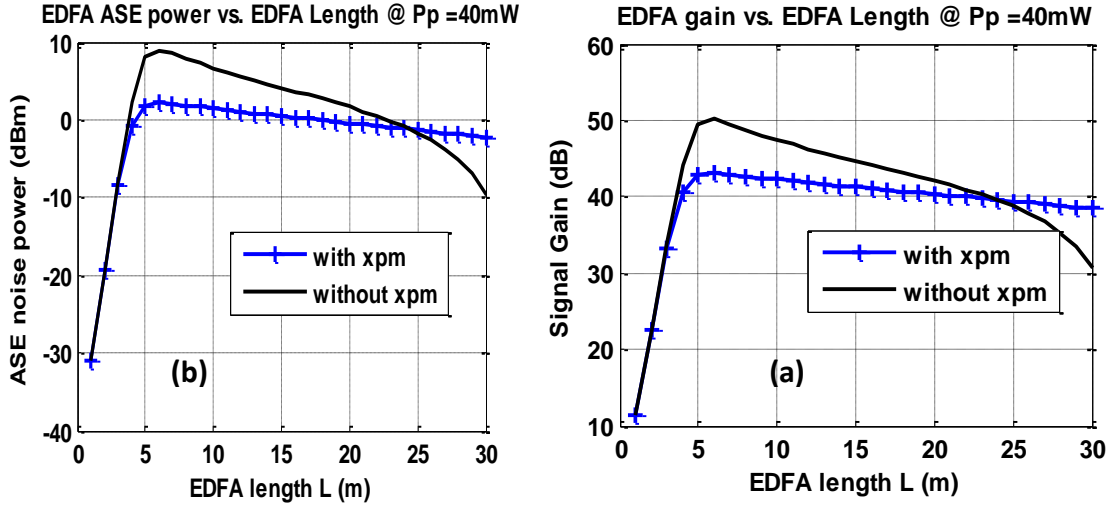
يبين الشكل (4-a) تغير ربح المضخم مع الطول ويظهر تأثير XPM على ربح المضخم مع استخدام استطاعة مضخة تبلغ 10mW، حيث لاحظنا ان زيادة استطاعة المضخة حتى 10mW يسبب زيادة الربح حتى 43dB. كما نلاحظ انخفاض اسرع للربح في حالة غياب تأثير XPM كما هو مبين في الشكل (4-a).



الشكل (4) (a) يبين تغير ربح المضخم مع طول، (b) تغير استطاعة ضجيج ASE المضخم مع الطول، من أجل استطاعة ضخ 10mW بوجود تأثير xpm (+) وبإهماله (المنحني المستمر)

٤-١-٣- عند استطاعة ضخ 40mW:

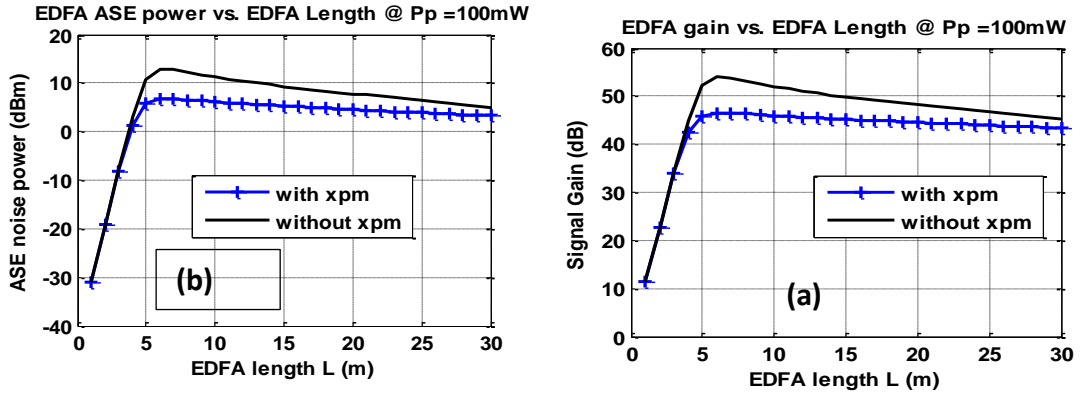
عند استطاعة ضخ عالية 40mW يزداد الربح مع زيادة الطول حتى الوصول إلى قيمة عظمى 50dB عند الطول الأمثل نفسه، ثم ينخفض الربح بزيادة الطول، ونلاحظ بالمقارنة بين المنحنيين إن قيمة الربح عند الأخذ بالحسبان تأثير XPM تكون أقل عند الطول الأمثل أي بسبب XPM تناقص الربح، كما ينخفض بشكل ابطأ إلى القيمة 38dB عند طول 30m، بينما ينخفض الربح بشكل اسرع إلى 32dB عند الطول 30m عند إهمال XPM. ويبلغ الطول الأمثل القيمة (5m) من أجل كلا الحالتين، كما أن هناك نتيجة يجب ملاحظتها أن الربح خارج مجال الطول الأمثل يكون أعلى مع زيادة الطول عند الأخذ بالحسبان تأثير XPM، وهذا يتوافق مع النتائج التجريبية في المراجعيات [1]، ويعود سبب هذا التأثير إلى أنه قبل الطول الأمثل تزداد شدة XPM مع زيادة الطول حتى قيمة محددة للطول، وزيادة استطاعة الإشارة حتى قيمة محددة يبدي XPM إشباع، وبالتالي بعد الطول الأمثل يسبب إشباع الـ XPM انخفاضاً في الربح ابطأ من حالة إهمال XPM.



الشكل (5) (a) يبين تغير ربح المضخم مع طوله، (b) تغير استطاعة ضجيج ASE المضخم مع الطول، من أجل استطاعة ضخ 40mW بوجود تأثير XPM (+) ويهمله (المنحني المستمر)

٤-١-٤ - من أجل استطاعة ضخ 100mw:

عند استخدام بزيادة استطاعة المضخة إلى 100mW يظهر تأثير XPM بشكل أكبر، بسبب انخفاض واضح في الربح كما هو ملاحظ من الشكل (6-a)، حيث ينخفض الربح من 54dB بغياب تأثير XPM إلى 41dB بوجود تأثير XPM، كما يترافق ذلك مع انخفاض استطاعة ASE بوجود تأثير XPM.



الشكل (6) (a) تغير ربح المضخم مع الطول ، (b) تغير استطاعة ضجيج ASE المضخم مع الطول، من أجل استطاعة ضخ 100mW بوجود تأثير XPM (+) ويهمله (المنحني المستمر)

تبين النتائج أنه عند طول منخفض للمضخم يكون تأثير XPM منخفض جداً يكاد يعدم حتى من أجل استطاعات الضخ المرتفعة أي لا يوجد تأثير لـ XPM على الربح، وعند الطول الأمثل ينخفض الربح في حالة وجود XPM من أجل استطاعة دخل منخفضة (-40dBm=0.1mW).

كما نلاحظ انه عند زيادة استطاعة المضخة إلى 100mW ينخفض الربح بوجود XPM على طول المضخم كما يظهر الشكلين (5-a)، (6-a).

إن تغيرات استطاعة ASE مماثلة لتغيرات الربح كما هو مبين في الاشكال (5-b)، (6-b) حيث بلغت قيمتها (8dBm, 13dBm) عند الضخ بالاستطاعات (40mW, 100mW) والجدول التالي يبين القيم العددية للنتائج السابقة:

الجدول (2) يبين مقارنة قيم الربح واستطاعة ASE بوجود تأثير XPM:

Pp[mW]	5	10	٤٠	١٠٠
Lmax[m]	5	5	٦	٦
G[dB]	٣٨.٣	٤٣.٢	٥٠.٢	٥٤
G[dB]/XPM	٣٦	٣٦.٩	٤٣.٥	٤١
ASE[dBm]	-3	1.7	٨.٩	١٢.٩
ASE[dBm]/XPM	-4.5	-4	٤.2	٤

٤-٢- دراسة تأثير استطاعة الضخ على الربح بوجود تأثير XPM:

نلاحظ من النتائج ينعدم تأثير XPM عند أطوال منخفضة لليف المضخم EDFA، لكن عند أطوال أعلى يكون هناك تغير في الربح بفعل XPM، حيث يتسبب إزاحة المنحني نحو اليسار هذا يعني حدوث إشباع بالربح بشكل سريع عند استطاعة ضخ أقل، وهذا يقلل فعالية المضخم كما هو مبين في الشكل (9)، (10) وذلك من أجل استطاعة دخل -40dBm وطول مضخم 20m، 30m.

يحدث إشباع في الربح من أجل قيم منخفضة لاستطاعة المضخة حيث إن زيادة استطاعة المضخة بعد قيمة 10mw يبقى الربح ثابتاً تقريباً أو تكون الزيادة في الربح منخفضة، أي نستنتج ان:

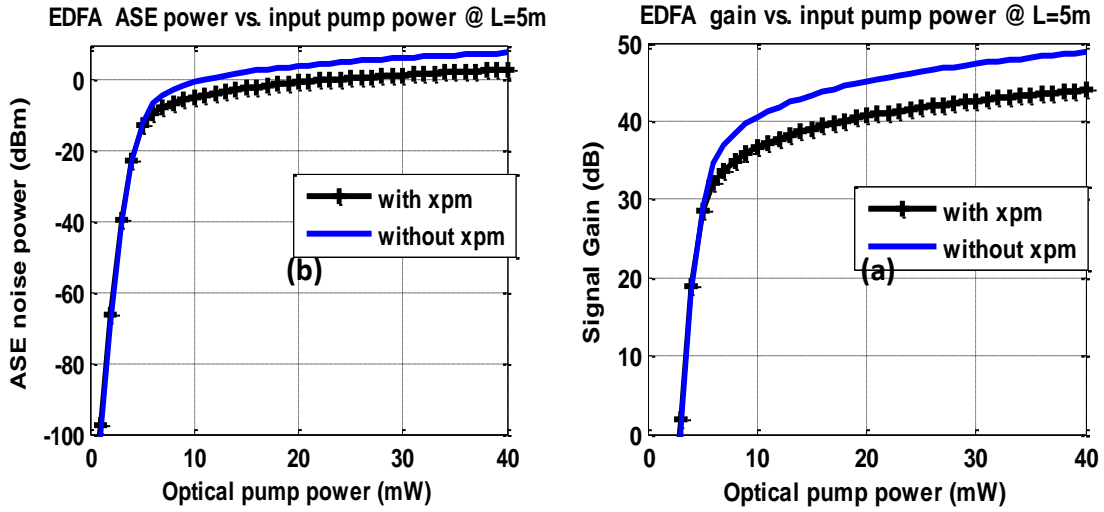
-المضخم عندما يعمل في مجال إشباع استطاعة المضخة فإن XPM تجعل الربح أعلى عند استطاعات ضخ أقل من استطاعة الإشباع وذلك من أجل الطول الأمثل. بينما عند طول فوق الطول الأمثل يكون الربح أعلى بوجود XPM.

- عند أطول مرتفعة للمضخم نجد أن ربح المضخم يتطلب استطاعات ضخ أعلى عند إهمال تأثير XPM، وعند استطاعات ضخ منخفضة يتسبب XPM في حدوث إشباع عند استطاعة ضخ أخفض.

-زيادة استطاعة المضخة تسبب زيادة تأثير XPM في الربح، فيزداد انخفاض الربح بتأثير XPM. وتظهر النتائج التجريبية في المراجعات المدروسة أنه قبل الطول الأمثل يزداد XPM مع زيادة الطول لكن تتوقف الزيادة عند الطول الأمثل، وعندما تبلغ استطاعة الإشارة قيمة معينة يبدي XPM إشباع وبالتالي زيادة طول المضخم بعد الطول الأمثل إشباع XPM يجعل منحنى الربح يتناقص بشكل ابطاً من حالة عدم اعتبار XPM.

٤-٢-١- دراسة تغير الربح مع استطاعة المضخة عند L=5m:

نلاحظ من المنحنيات في الشكل (7) أنه عند استطاعة ضخ منخفضة ومن أجل طول منخفض للمضخم لا يوجد تأثير يذكر لـ XPM في الربح أو استطاعة ضجيج ASE، بينما يبدأ ظهور تأثير XPM في الربح بعد استطاعة الإشباع فيسبب انخفاض في ربح المضخم وكذلك في استطاعة ASE.

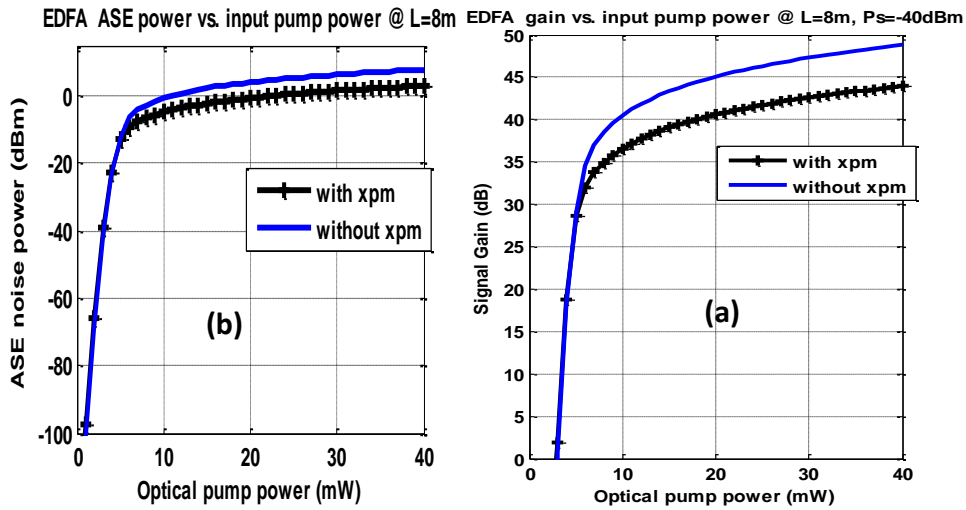


الشكل (7) (a) تغير ربح المضخم مع استطاعة ضخ، (b) تغير استطاعة ضجيج ASE المضخم مع استطاعة ضخ من أجل الطول 5m بوجود تأثير XPM (+) ويإهماله (المنحني المستمر)

٤-٢-٢- دراسة تغير الربح مع استطاعة المضخة عند $L=8m$:

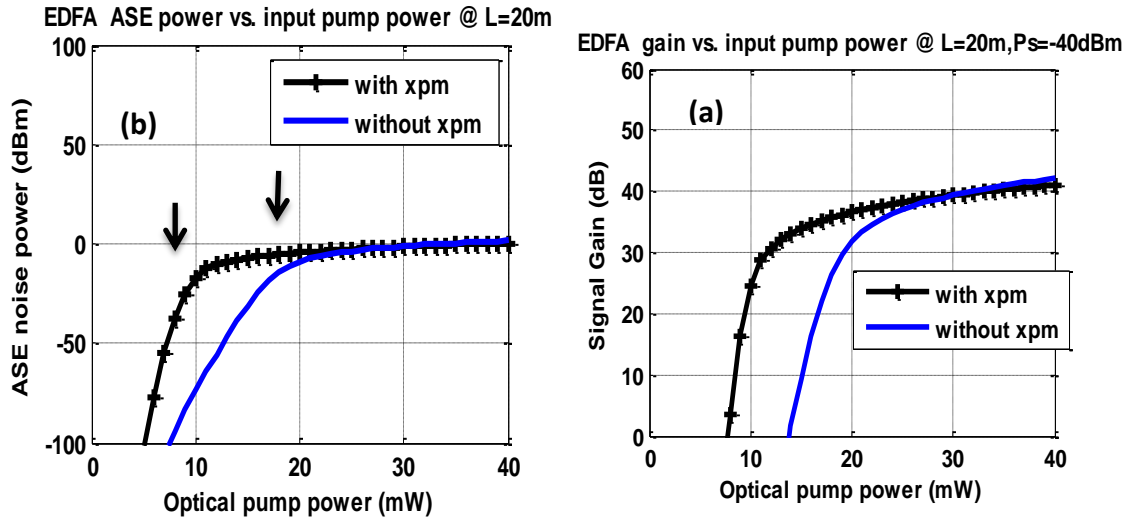
وزيادة طول المضخم إلى 8m نجد نفس السيناريو قد طرأ على تغير منحنى الربح واستطاعة ASE المبينة في

الشكل السابق.

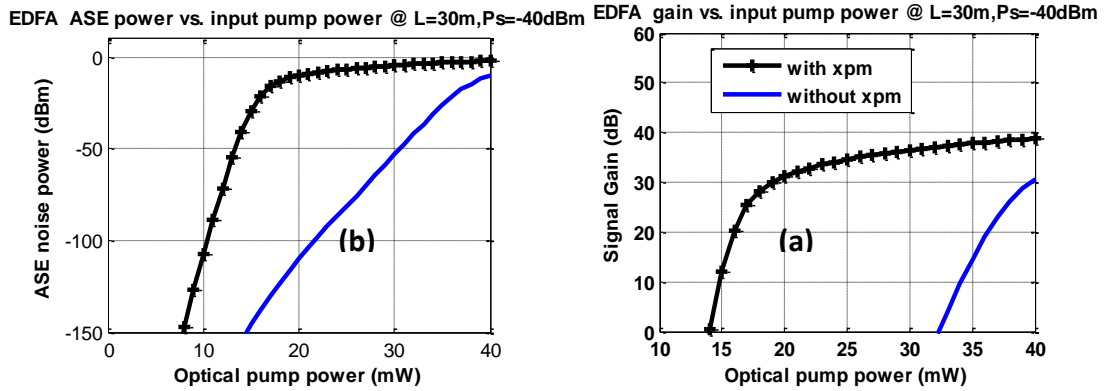


الشكل (8) (a) تغير ربح المضخم مع استطاعة ضخ (b) تغير استطاعة ضجيج ASE المضخم مع استطاعة ضخ، من أجل الطول 8m بوجود تأثير XPM (+) ويإهماله (المنحني المستمر)

نلاحظ من المنحني السابق أن قيمة الربح بوجود XPM تكون أخفض من الربح بحالة غياب تأثيره ويلاحظ حصول إشباع XPM بعد استطاعة 20mW. من خلال هذه النتائج يمكن استنتاج القيم الأفضل لتحسين أداء المضخم. وزيادة طول المضخم إلى أطوال فوق 20m نلاحظ حدوث إشباع للربح عند استطاعات ضخ أخفض وهذا يعني أن أي زيادة في استطاعة الضخ لن تؤدي إلى زيادة في الربح كما هو مبين في الشكل (9) كما نلاحظ أنه عند هذه الأطوال يجعل XPM انخفاض الربح أقل من حالة عدم وجوده.



الشكل (٩) (a) تغير ربح المضخم مع استطاعة ضخ من أجل الطول 20m بوجود تأثير XPM (+) ويإهماله (المنحني المستمر)، (b) تغير استطاعة ضجيج ASE المضخم مع استطاعة الضخ



الشكل (10) (a) تغير استطاعة ضجيج ASE المضخم مع استطاعة ضخ من أجل الطول 30m بوجود تأثير xpm (+) ويإهماله (المنحني المستمر)، (b) تغير ربح المضخم مع استطاعة الضخ

جدول (3) يبين مقارنة بين خصائص مضخم بوجود تأثير XPM ويإهماله من حيث الربح الأمثل واستطاعة الضجيج الناتجة:

$L[m]$ $P_p=40mW$	٥	٨	٢٠	٣٠
G[dB]	49.5	٤٨.٧	٤١	٣٨.٨
G[dB]/with XPM	٤٤.١	٤٣.٩	٤٢.١	٣٠.٦
ASE[dBm]	٨	٧.٨	٠.٣٤	-1.89
ASE[dBm]/XPM	٣	٣	١.٦٣	-9.7

٥- الاستنتاجات والتوصيات:

اعتمد هذا البحث على تصميم مضخم EDFA باستخدام طريقة splicing method مع الأخذ بالحسبان تأثير XPM اللاخطي لتحديد تأثيره في أداء المضخم EDFA من حيث قيمة الريح، إشباع الريح. قمنا بمحاكاة النموذج الرياضي للمضخم من أجل الحصول على النتائج المطلوبة وقمنا ببرمجة الخوارزمية باستخدام برنامج MATLAB.

التوصيات: بناءً على النتائج التي تم التوصل إليها:

- قدمت الدراسة التصميمية تصوراً واضحاً عن القيم الأفضل من حيث خصائص الريح واستطاعة الضجيج واللاخطية الناتجة، من خلال البحث في تأثير البارامترات التصميمية على ربح المضخم الضوئي EDFA، حيث تم التوصل إلى ما يلي:

١- إن زيادة استطاعة المضخة في مضخم EDFA تزيد قيمة ربحه، لكنها تخفض تسطح الريح وعرض حزمة الريح المسطح، يزداد الريح بزيادة استطاعة المضخة حتى قيمة اعظمية للريح ثم تتوقف هذه الزيادة عند استطاعة الإشباع.

٢- كما أن استخدام استطاعات ضخ منخفضة تسبب حدوث انخفاض في ربح EDFA عند طول محدد للمضخم أي يحدث زيادة في ربح المضخم حتى قيمة عظمى توافق طول محدد يمثل الطول الأمثل ليتناقص الريح بعد هذا الطول، كما أن زيادة استطاعة المضخة وطول المضخم تسبب زيادة أيضاً في استطاعة ضجيج ASE، لذا تم اختيار القيم التصميمية الأفضل بدقة.

٣- قدم النموذج المقترح أيضاً امكانية الحصول على نتائج تظهر تأثير XPM في EDFA ومن ثم اختيار القيم الأفضل للبارامترات التصميمية، حيث كانت قيمة استطاعة الضخ 40mW هي الأفضل، وتبين ان زيادة طول المضخم فوق 15m يسبب انخفاض واضح في ربح المضخم.

٦- المراجع:

- [1] JING, H., JIANQUAN, Y., 2003, "*The amplified model of erbium-doped fiber amplifier (EDFA) with cross-phase modulation (XPM)*", Elsevier Science, Optics Communications, Vol. 220 (03), pp. 433-438.
- [2] XUE, L. Y., 2008, "*FWM and XPM in Er³⁺-doped silica and tellurite fibers*", Optics Communications, Volume 281, Issue 6, pp. 1558-1567.
- [3] SINGH, M.; RAGHUWANSHI, S. K., 2013, "*Analysis of The Crosstalk in Optical Amplifiers*", Ictact Journal on Communication Technology, Vol. 04, Issue: 02, PP.744-749.
- [4] SAZZAD, S.; SHARIF, M. G., 2018, "*Investigate FWM effect and optical power management by employing the EDFAs*", International Research Journal of Engineering and Technology (IRJET), Volume: 05 Issue: 05.
- [5] BAYVEL P.; KILLEY R., 2002, "Nonlinear Optical Effects in WDM Transmission. In: *Optical Fiber Communications*". Elsevier Science (USA), United Kingdom, 611-641,.
- [6] GOVIND P., 2006, "Nonlinear Effects in Optical Fibers". Institute of Optics, University of Rochester, 10.
- [7] TILAK, M.; ANGSHUMAN, M.; SANKAR, G., 2022, "*Effect of Kerr nonlinearity on signal and pump intensities in EDFA comprising single-mode step index fiber: Estimation by a simple but accurate mathematical formalism*", Results in Optics, Vol(8), pp. 1-8.
- [8] LIU, N.; LIAO, CH.; GUO, Q., 2000, "*The cross-phase modulation in erbium-doped fiber amplifiers*", Optics Communications, Vol. 183(1), pp. 271-275.
- [9] IMRAN, S.M.S., 2011, "*Design and Optimization of an Erbium Doped Fiber Amplifier in Amplified Lightwave System*", Dhaka Univ. J. Eng. & Tech. Vol. 1(2), PP. 137-140.
- [10] KRISHNAN, R., August 2015, "*Modelling Of an Erbium Doped Fiber Amplifier and Simulation of Its Gain Flattening Methods*", (IJETR), Vol.3, Issue-8, pp. 154-157.
- [11] HAMIDA, N.; CHENG X. S., 2011, "*Review of Erbium-doped fiber amplifier*", International Journal of the Physical Sciences Vol. 6(20), pp. 4674-4689.
- [12] WARTAK, M., 2013, "*Computational Photonics an Introduction with Matlab*", Cambridge University Press, United States of America by, New York.
- [13] SUONG, H. N.; HOP, PH. Q., 2005, "*Simulation of The Gain Characteristics of EDFA*", Department of Telecommunications, Posts and Telecommunications Institute of Technology (PTIT), Vietnam.
- [14] AHMAD, N. A. B.; DAHLAN, S. H. 2017, "*Influence of fiber parameters to the erbium-doped fiber amplifier (EDFA) gain: A theoretical modeling*", EDP Sciences, EPJ Web of Conferences 162.
- [15] BERKDEMIR, C.; ÖZSOY, S., 2005, "*An investigation of the temperature dependency of the relative population inversion and the gain in EDFAs by the modified rate equations*", Optics Communications, Department of Physics, Faculty of Science and Literature, Erciyes University, Turkey, Volume 254, Issues 4-6, PP. 248-255.
- [16] NUSINSKY, I.; HARDY, A. A., 2004, "*Multichannel Amplification in Strongly Pumped EDFAs*", Journal of Lightwave Technology, VOL. 22, NO. 8, PP.1946-1952.
- [17] RAGHUWANSHI, S. K.; SHARMA, R. 2015, "*Modeling of forward pump EDFA under pump power through MATLAB*", SPRINGER, Department of Electronics Engineering, Indian School of Mines, Dhanbad 826004, Jharkhand, India Int Nano Lett, Vol. 5, PP.155-160.

- [18] GOVIND, P., 2007, "*Nonlinear Fiber Optics. Elsevier Science*", 4th Ed, united state of America, 534.
- [19] MAYROCK, M., 2010, "*Analysis and Compensation of Non-linear Signal Distortion in Optical OFDM*". Friedrich-Alexander-Universitat Erlangen-Nurnberg Cauerstr, 5.
- [20] CHAUHAN, R.. S., 2015, "*Basic Analysis of Gain vs Pump Power*", International Journal of Advance Engineering and Research Development, Volume 2, Issue 4, PP. 19-24.
- [21] GAUTAM, S.; GUPTA, N., 2016, "*L - Band Variable Gain Amplifier with Erbium Doped Fiber Switching*", International Journal of Advanced Research in Electronics and Communication Engineering (IJARECE), Volume 5, Issue 1, PP. 42-51.
- [22] UFUK, P., 2020, "*Numerical analysis of pump-signal-direction effect on the performance of EDFA systems*", Engineering Computations, Vol. 37 No. 4, pp. 1155-1178.

قائمة المصطلحات

التسمية بالانجليزية	التسمية بالعربية
Attenuation	التخميد
Bandwidth	عرض الحزمة
Channel crosstalk	تداخل الحديث في القناة
Doped fiber	ليف مشاب
Energy Levels	السويات الطاقية
Erbium ions	ايونات الاربيوم
Gain	الريح
Gain bandwidth	عرض حزمة الريح
Ground State	السوية الارضية
Kerr Effect	تأثير كبير
Metastable State	السوية اللاستقرارية
Population	السكان (الذرات)
Population Inversion	الانعكاس السكاني
Pump wavelength	طول موجة المضخة
Pump power	استطاعة المضخة
Single-Mode	وحيدة النمط
Steady state	الحالة المستقرة
Stimulated Emission	الإصدار المُحفز (المُستثار)
Stimulated State	السوية المثارة

قائمة الرموز

الرمز	الدلالة
α	معامل تخميد الليف
L	طول الليف
λ	طول الموجة
P_p	استطاعة الضخ
P_s	استطاعة إشارة المعلومات
A	مساحة القلب
A_{eff}	مساحة الفعالة للقلب
G	ريح
I_p	شدة موجة المضخة
ν_p	تردد المضخة

	v_s	تردد فوتون ستوكس
	B	عرض حزمة
	c	سرعة الضوء
	h	ثابت بلانك
	$n(\lambda)$	هو دليل الانكسار الخطي للمادة
	n_1	دليل انكسار القلب
	n_2	دليل انكسار الغلاف
	n_{eff}	دليل الانكسار الفعال
	N	كثافة الذرات
	V	سرعة الموجة
	f	تردد الإشارة
	σ_s, σ_{21}	المقطع العرضي للانبعاث
	σ_p, σ_{12}	المقطع العرضي للامتصاص
	Γ_{21}	احتمال الانتقال من السوية ٢ إلى السوية ١
	Γ_{32}	احتمال الانتقال من السوية ٣ إلى السوية ٢
	ϕ_p	استطاعة تدفق المضخة المؤثرة
	ϕ_s	استطاعة تدفق الإشارة المؤثرة
	T	زمن الحياة في السوية الطاقية
	τ_r	زمن حياة اشعاعي
	n_{sp}	بارامتر الانعكاس السكاني
	γ	عامل التبعثر، عامل اللاخطية
	P_{sat}	استطاعة الاشباع
	Γ_s, Γ_p	عامل التداخل (التقاطع) للإشارة والمضخة
	ρ	كثافة الايونات
	P_{ASE}	استطاعة ضجيج الاصدار التلقائي للمضخم
	ω	حجم البقعة
	R	نصف قطر توزع ذرات الاريبيوم
	a	نصف قطر القلب لليف
	Γ_{12}, Γ_{21}	معدل الانتقال بين السويتين ١ و ٢
	Pi	استطاعة إشارة الدخل البصرية
	Po	استطاعة إشارة الخرج البصرية
	$\alpha(\lambda)$	معامل الامتصاص
	$g(\lambda)$	معامل الاصدار