

## دراسة نظرية لتحديد الطول المثالي لمضخم ليفي مُطَمَّم بالإيريوم وفق نظام المرحلة الواحدة والمرور الواحد

الدكتور نزار شعبان\*

الدكتور صلاح الدين نور الدين\*\*

(تاريخ الإيداع 4 / 8 / 2016. قُبِلَ للنشر في 20 / 11 / 2016)

### □ ملخّص □

يعنى هذا البحث بعرض منهجية لتحديد الطول المثالي للليف المشوب المستخدم في بناء مضخم ليفي نظرياً باستخدام برنامج الماتلاب. حيث تبين أن الطول المثالي للليف يتعلق بكل من كثافة الإثابة ونصف قطر لب الليف واستطاعة الضخ وشدة إشارتي الدخل والخرج .

**الكلمات المفتاحية:** المضخم الليفي، كثافة الإثابة ، شدة إشارة الدخل، و ربح المضخم.

---

\* مدرس - المعهد العالي لبحوث الليزر وتطبيقاته - جامعة دمشق - سورية  
\*\*أستاذ مساعد - كلية هندسة وتكنولوجيا المعلومات - جامعة طرطوس - سورية

# Theoretical study of erbium doped fiber amplifier one-stage single-pass configuration

Dr. Nizar Shaaaban \*  
Dr. Salahaldin. Nuoraldin \*\*

(Received 4 / 8 / 2016. Accepted 20 / 11 / 2016)

## □ ABSTRACT □

We determined the optimal length of the fiber amplifier theoretically by solving numerically set of differential equations of a single stage and one pass amplifier, using MATLAB. Input values, as doped density, core radius, pumping power and input signal were changed, and the optimal fiber length was calculated.

**Keywords:** fiber amplifier ,doped density, input signal and amplifier gain.

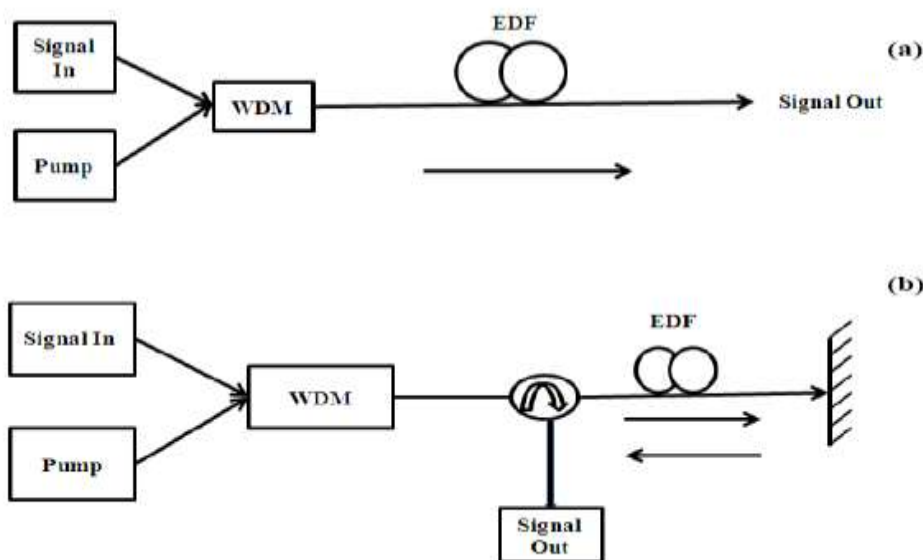
---

\* Assistant Professor, Higher Institute for Laser research and Application- Damascus University-Syria  
\*\* Faculty of Technology Engineering of Information and Communication, Tartous University, Syria

**مقدمة:**

يحظى المضخم الليفي المطعم بالإيريوم بميزات مكنته من الدخول في معظم التطبيقات الصناعية والعلمية، ولا سيما في مجال الاتصالات [1] ، إلا أنه لاتزال هناك صعوبة في نقل الإشارة الضوئية ضمن الليف لمسافات تزيد عن 100km بسبب ما تعانيه الإشارة من امتصاص وتشتت ضمن الليف ، الأمر الذي يسبب في انخفاض شدة الإشارة [1,2]. بالرغم من وجود دراسات كثيرة في هذا المجال إلا أنه لاتزال قيمة الريح في عملية التضخيم الليفي لا تتجاوز 25dB. لتحقيق ربح عالٍ في عملية التضخيم، لا بد من اختيار أمثل القيم للبارامترات (طول الليف، قطره، نسبة الاشابة، استطاعة الضخ وشدة إشارة الدخل) التي تؤثر في الريح [3]، لهذا قمنا بدراسة نظرية لزيادة كفاءة المضخم الليفي عن طريق التحكم بطول الليف وقطره ونسبة الاشابة وكل من استطاعة الضخ وشدة إشارة الدخل .

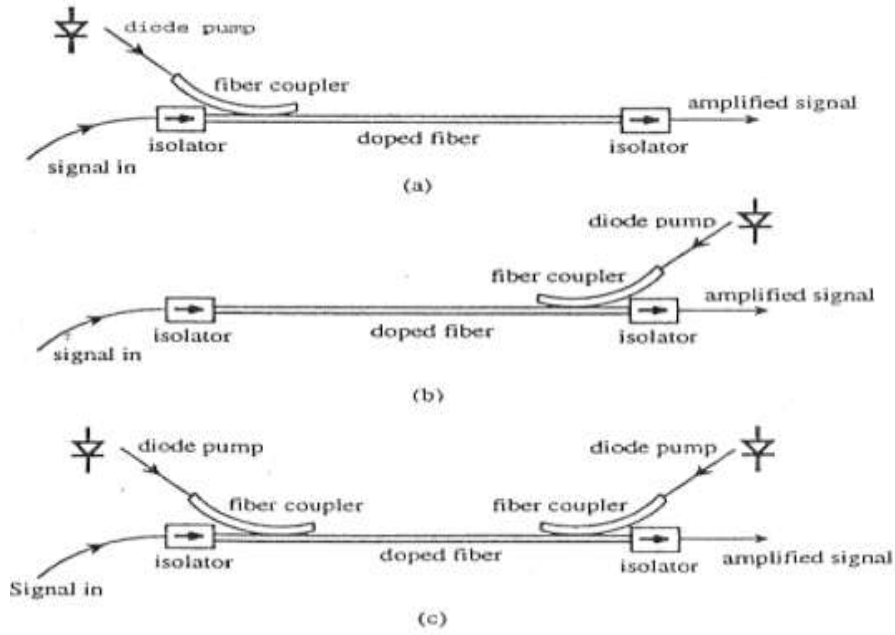
يوجد عدة تصاميم للمضخم الليفي، بمرحلة واحدة أو مراحل متعاقبة، بمرور واحد أو مرورين، كما هو مبين في الشكل (1).



الشكل(1). تصميم المضخم الليفي ذي المرحلة الواحدة: (a) مرور واحد، (b) مرورين

في المرور الواحد، تمر الإشارة المراد تضخيمها مرة واحدة عبر الوسط الفعال، أما في حالة المرورين فيحتاج الأمر لعاكس إشارة، يجعلها تمر مرة ثانية عبر الوسط الفعال.

تقسم تصاميم المضخمات من حيث طريقة الضخ إلى ثلاثة أقسام موضحة بالشكل (2). في الحالة (a) يكون الضخ أمامياً، حيث ينتشر الضخ والإشارة المراد تضخيمها في نفس الاتجاه، ويتميز هذا التصميم بأنه يولد ضجيجاً أقل. في الحالة (b) ،ينتشر الضخ والإشارة في اتجاهين متعاكسين ويتميز بتوليد ربح أعلى. في الحالة (c) ،يتم الضخ بالاتجاهين ويجمع بين ميزات التصميمين السابقين [5,6].



الشكل (2). أشكال المضخ

يتم استخدام التشكيل المناسب وذلك حسب الهدف من المضخم المراد بناؤه وهناك العديد من الدراسات حول الريح والضجيج في كل شكل من أشكال هذه التصاميم [8]. يتراوح ربح المضخم الليفي بين 10dB و 61dB وذلك تبعاً للعوامل المؤثرة في ربح المضخ [9]. أما بالنسبة للمضخم الليفي المشاب بالإيريبيوم ذو مرحلة واحدة وعبر واحد فإن أعلى ربح يمكن الوصول إليه نظرياً عند الاختيار الأمثل لجميع البارامترات هو 33dB أما تجريبياً فهو بحدود [9][10][11] 25 dB. قمنا في هذا العمل بدراسة ربح المضخم نظرياً وفق نظام المرحلة الواحدة والمرور الواحد، بواسطة برنامج حاسوبي .

### أهمية البحث وأهدافه:

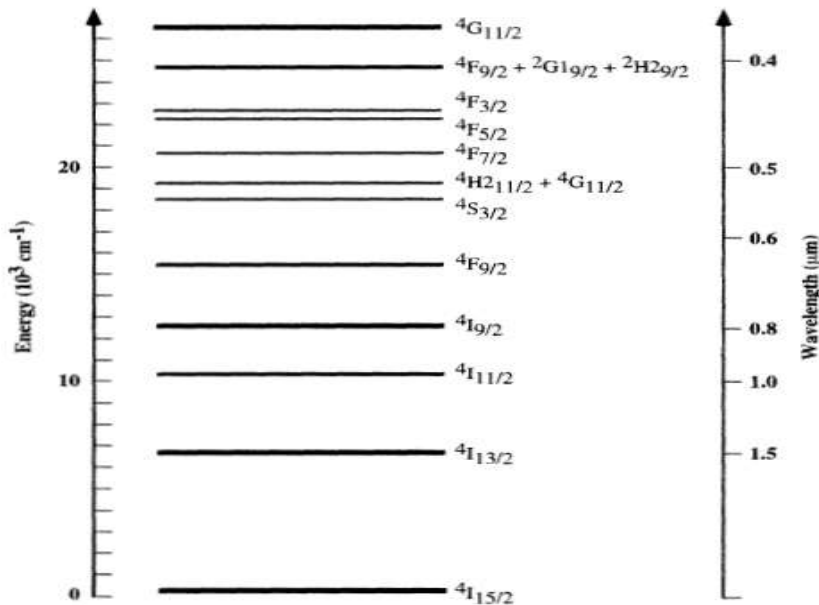
نظراً لأهمية المضخم الليفي الطعم بالإيريبيوم ودخوله في العديد من التطبيقات الصناعية والعلمية ولا سيما في مجال الاتصالات، تصبح هذه الدراسة في غاية من الأهمية والحوية. لذلك كان هدفنا من البحث تطوير منهجية لتحديد الطول المثالي لليف المشوب المستخدم في بناء مضخم ليفي باستخدام برنامج الماتلاب.

### طرائق البحث ومواده:

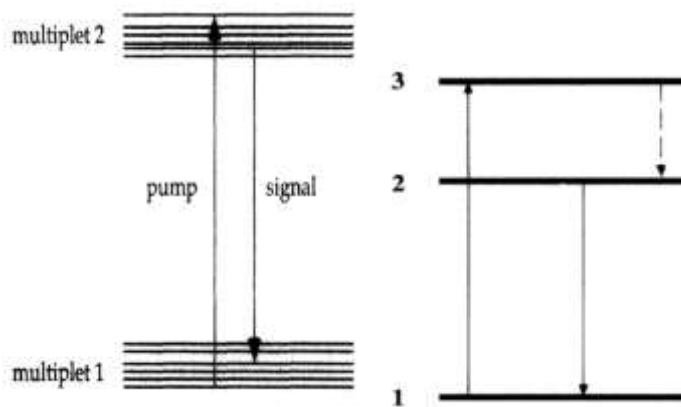
#### العلاقات الأساسية:

يبين الشكل (4-a) مخطط سويات الطاقة للإيريبيوم، ومن الواضح أنه مؤلف من ثلاث سويات طاقة، ويفرض حدوث انتقال سريع من السوية الثالثة الى السوية الثانية، ويفرض أن السوية الثالثة هي جزء من السوية الثانية المتعددة السويات يمكن اعتبار مخطط الطاقة للإيريبيوم كثنائي سويات طاقة كما هو مبين في الشكل (4-b) مع إبقاء السوية

الثالثة مضمنة ضمن المعادلات من خلال تعويض قيمة سطح مقطع السوية الثالثة ضمن معامل سطح مقطع امتصاص الضخ.



(a)



(b)

الشكل (4). (a) سويات الطاقة لأيون الإربيوم  $Er^{+3}$ ، (b) التحول من نظام ثلاث سويات إلى نظام سويتين

وبحسب الدراسة النظرية وفق المرجع [1]، يمكن كتابة مقدار إسكان السوية العليا بدلالة كثافة الإشابة وشدة الضخ وبإهمال معامل الإصدار التلقائي المضمخ ASE على النحو الآتي:

$$N_2 = \frac{\frac{\tau\sigma_s^a \Gamma_s P_s}{Ah\nu_s} + \frac{\tau\sigma_p^a \Gamma_p P_p}{Ah\nu_p}}{\frac{\tau(\sigma_s^a + \sigma_s^e) \Gamma_s P_s}{Ah\nu_s} + \frac{\tau(\sigma_p^a + \sigma_p^e) \Gamma_p P_p}{Ah\nu_p} + 1} N$$

حيث  $N_2$ -كثافة الذرات في السوية العليا،  $N$ -الكثافة الكلية للذرات،  $\tau$ -زمن حياة السوية الليزرية،  $\sigma_s^a$  و  $\sigma_p^a$  سطح مقطع الامتصاص لكل من الإشارة والضخ على الترتيب،  $\sigma_s^e$  و  $\sigma_p^e$ -سطح مقطع الإصدار لكل إشارة الدخل وإشارة الضخ على الترتيب،  $A$ -سطح المقطع الفعال لليفي،  $h$ -ثابت بلانك،  $v_p$  و  $v_s$  تواتر كل من إشارة الدخل وإشارة الضخ على الترتيب،  $P_p$  و  $P_s$ -استطاعة كل من إشارة الدخل وإشارة الضخ على الترتيب،  $\Gamma_p$  و  $\Gamma_s$  عاملا التراكم بين لب الليفي المطعم وكل من إشارة الدخل وإشارة الضخ على الترتيب [1]. وتكتب معادلات انتشار كل مرآة إشارة الدخل وإشارة الضخ بإهمال الضياعات الداخلية بالشكل التالي [1]:

$$\frac{dP_p}{dz} = (N_2 \sigma_p^e - N_1 \sigma_p^a) \Gamma_p P_p$$

$$\frac{dP_s}{dz} = (N_2 \sigma_s^e - N_1 \sigma_s^a) \Gamma_s P_s$$

بحل هذه المعادلات باستخدام الماتلاب وطريقة رونج-كوتا من المرتبة الخامسة واستخدام قيم الثوابت الواردة في الجدول (1)، تم التوصل إلى تحديد الطول المحقق لأعلى ربح (الطول المثالي)، عند تغيير إحدى البارامترات التالية (الإشابة، نصف قطر اللب، استطاعة الضخ، استطاعة إشارة الدخل).

الجدول (1). الثوابت المستخدمة في البرنامج الحاسوبي

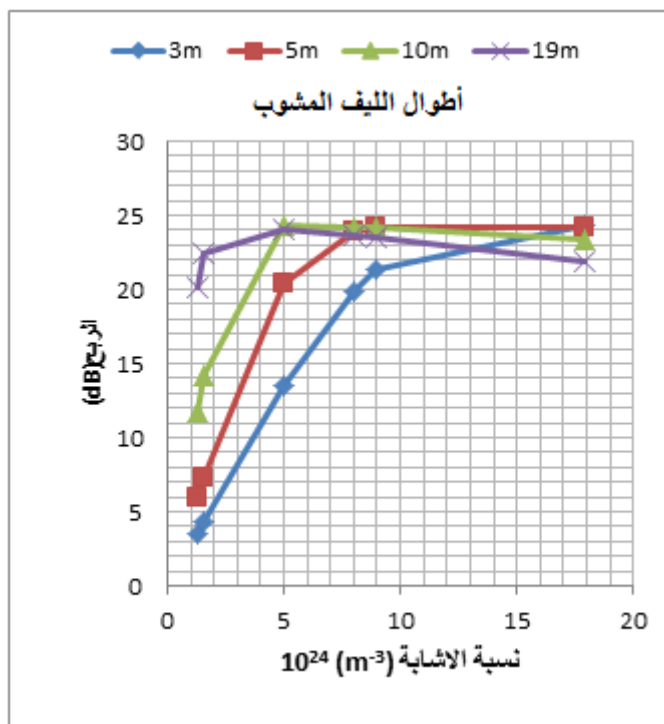
$10 \cdot 10^{-3}$	$\tau$	زمن حياة السوية الليزرية (s)
$2.09 \cdot 10^{-25}$	$\sigma_s^a$	سطح مقطع الامتصاص للإشارة ( $m^2$ )
$3.10510^{-25}$	$\sigma_p^a$	سطح مقطع الامتصاص للضخ ( $m^2$ )
$2.83 \cdot 10^{-25}$	$\sigma_s^e$	سطح مقطع الإصدار للإشارة ( $m^2$ )
0	$\sigma_p^e$	سطح مقطع الإصدار لطول موجة الضخ ( $m^2$ )
$3.793 \cdot 10^{-6}$	$r$	نصف قطر توزع الإشابة داخل الليفي (m)
$6.63 \cdot 10^{-34}$	$h$	ثابت بلانك (J.s)
$1.9 \cdot 10^{14}$	$v_s$	تواتر موجة الإشارة (Hz)
$3.06 \cdot 10^{14}$	$v_p$	تواتر موجة الضخ (Hz)
0.773	$\Gamma_s$	معامل التراكم للإشارة مع الإشابة
0.887	$\Gamma_p$	معامل التراكم للضخ مع الإشابة

## النتائج والمناقشة

### ❖ دراسة علاقة الطول المثالي لليفي بنسبة الإشابة

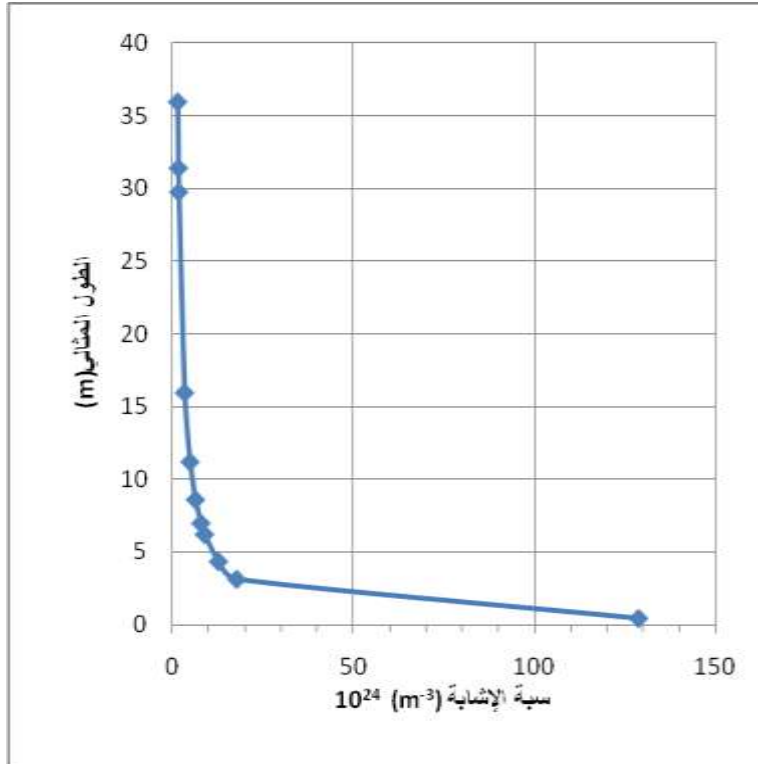
درسنا نظرياً وباستخدام البرنامج الحاسوبي علاقة طول المضخم المثالي بدلالة كثافة إشابة الليفي. تم استخدام القيم التالية: قطر اللب  $3.795 \mu m$ ، وقيمة الضخ  $0.283W$ ، وشدة إشارة الدخل  $0.575mW$ ، إضافة إلى القيم الواردة بالجدول (1).

تبين من خلال الدراسة وكما هو مبين في الشكل (5) أن ربح المضخم يتعلق بطول الليف المشوب ونسبة الإشابة، وأنه من أجل طول ليف 3m بنسبة إشابة منخفضة ( $10^{24}$ ) نحصل على أقل قيمة للربح ( $3.5dB$ ). وبتزايد نسبة الإشابة إلى ( $18 \times 10^{24}$ ) يزداد الربح ليصل إلى قيمة ( $25dB$ ) وهذا يعني أنه عند قيم منخفضة للإشابة يتوجب استخدام ليف طويل لتحقيق الربح المطلوب وهذا واضح من الشكل (5)، حيث أنه من أجل ليف بطول 19m ونسبة إشابة ( $10^{24}$ ) نحصل على قيمة ربح مقدارها ( $20dB$ )، بينما من أجل إشابة نفس الطول (أي 19m) بنسبة ( $18 \times 10^{24}$ ) تصبح قيمة الربح ( $23.5dB$ ). نستنتج من ذلك أنه يمكن تحقيق قيمة ربح في المضخم الليفي بزيادة نسبة الإشابة وتقليل طول الليف.



الشكل (5). تغير ربح المضخم بتغيير نسبة الإشابة عند أطوال مختلفة لليف .

يبين الشكل (6) تغير الطول المثالي لليف المشوب بدلالة نسبة الإشابة.، حيث يلاحظ أنه كلما زادت نسبة الإشابة كلما قل الطول المثالي لليف .

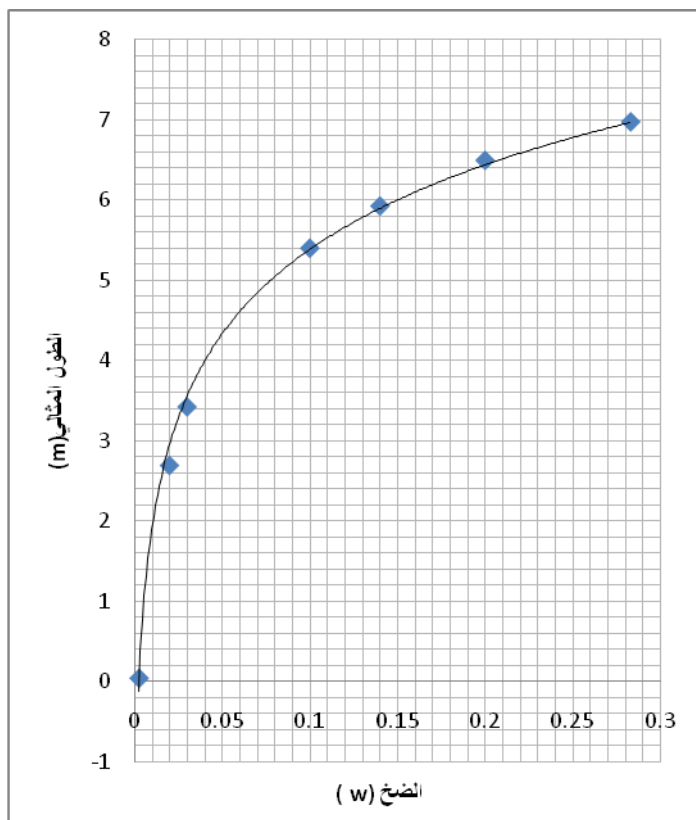


الشكل(6).تغير الطول المثالي لليف المشوب بدلالة الإشعاع

#### ❖ دراسة علاقة الطول المثالي لليف باستطاعة الضخ

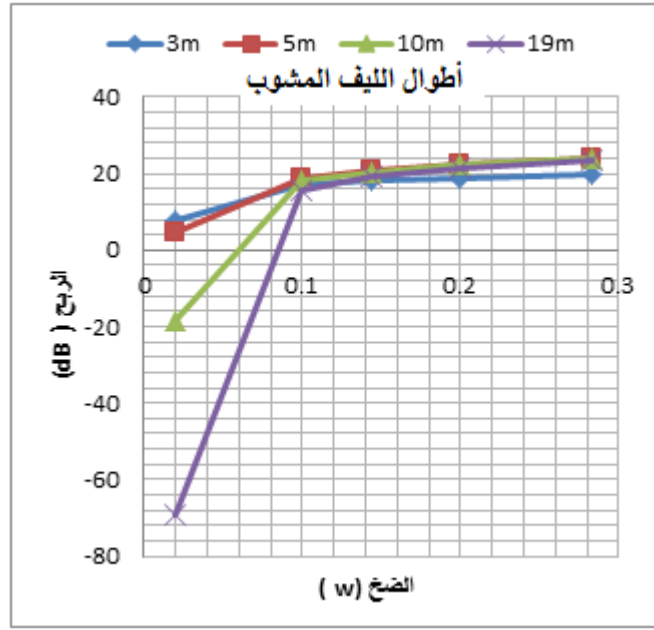
تمت دراسة علاقة الطول المثالي لليف بدلالة استطاعة الضخ عند نسبة إشعاع  $8 \times 10^{24} \text{ m}^{-3}$ ، وقطر اللب  $3.795 \mu\text{m}$ ، وشدة إشارة الدخل  $0.575 \text{ mW}$ ، كما هو مبين في الشكل (7)، حيث نلاحظ أنه في البداية يزداد المثالي بشدة مع زيادة الضخ ليصبح أقل تابعة من أجل استطاعات ضخ مرتفعة .





الشكل(7). تغير الطول المثالي للليف المشوب بدلالة استطاعة الضخ

يبين الشكل (8) العلاقة بين ربح المضخم واستطاعة الضخ عند أطوال مختلفة من الليف (3m,5m,10,19m) ويلاحظ من الشكل أن ربح المضخم ذي الليف القصير (3m) أكبر من ربح المضخات الأخرى في حالة الضخ المنخفض ، وأنه يتطلب استخدام أطوال كبيرة من المضخات عند استطاعات ضخ مرتفعة ، كما يلاحظ من الشكل أن الفرق بين ربح المضخات المختلفة الطول عند استطاعات الضخ المرتفعة يصبح قليل وذلك نتيجة الوصول لحالة الإشباع ، أي أنه عند هذه الحالة لا يعود الريح يتأثر بزيادة الضخ بشكل كبير .



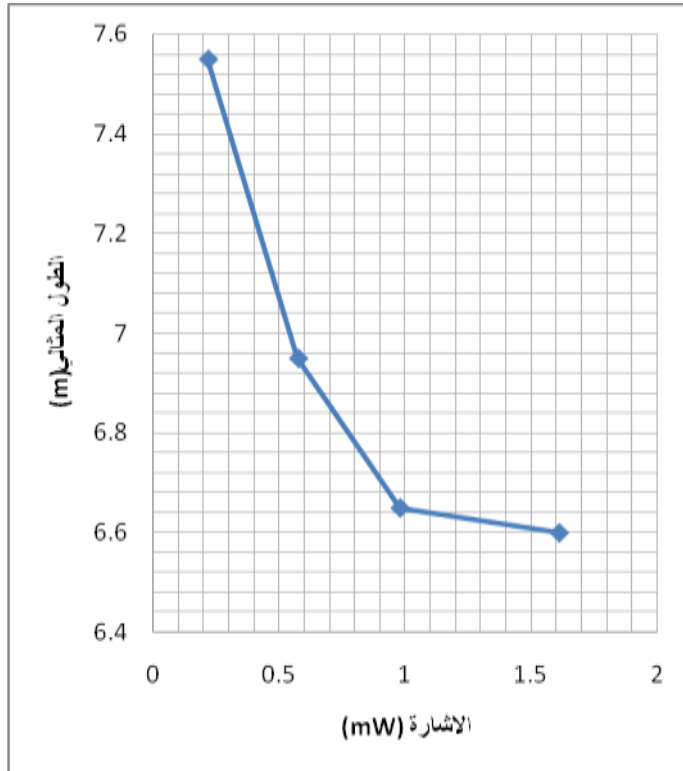
الشكل(8).تغير ربح المضخم بتغيير الضخ عند عدة أطوال للمضخم (3m,5m,10m,19m).

#### ❖ دراسة علاقة الطول المثالي باستطاعة إشارة الدخل

تمت دراسة علاقة الطول المثالي للليف باستطاعة إشارة الدخل عند : نسبة الإشابة  $8 \times 10^{24} m^{-3}$  وقيمة الضخ  $0.283W$ ، قطر اللب  $(3.795 \mu m)$ . فتبين أن الطول المثالي للليف يقل بزيادة إشارة الدخل، كما هو واضح في الشكل (9)، مما يستوجب استخدام مضخم طويل عند إشارة دخل منخفضة للإستفادة من كامل الضخ وتضخيم الإشارة .

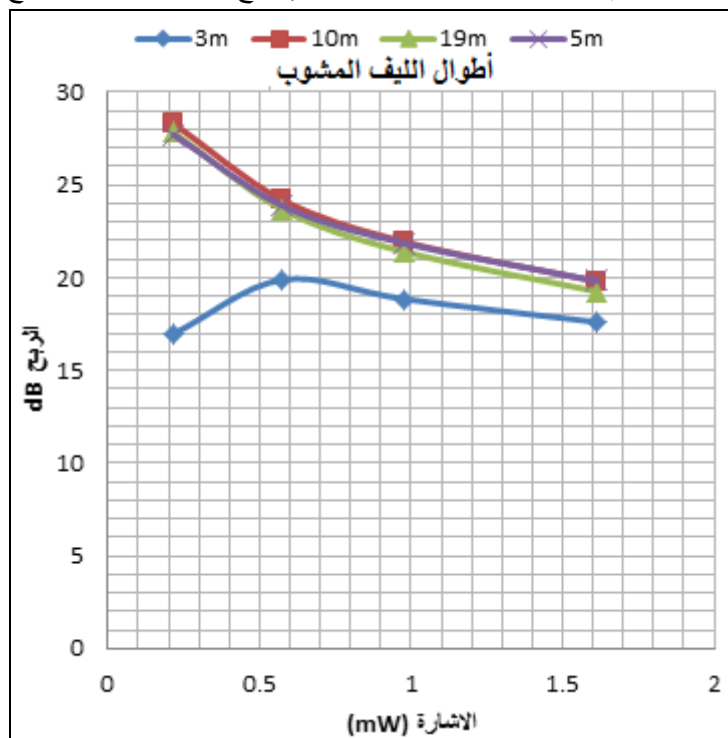
كما تبين بالدراسة أن ربح المضخمات بأطوال مختلفة (3m,10m,19m) ينقص بزيادة إشارة الدخل في حين يلاحظ بالنسبة للطول (3m) زيادة الربح بزيادة شدة إشارة الدخل ليبلغ قيمة عظمى عند إشارة دخل  $0.2 mw$ ، ثم ينخفض بعد ذلك كما هو مبين في الشكل (10). يمكن تفسير ذلك ببلوغ حد الإشباع ونمو الإصدار التلقائي للمضخم (ASE) عند إشارة دخل ضعيفة وضخ عالي على حساب الإشارة (1550nm).

يمكن تفسير نقصان ربح المضخمات بأطوال مختلفة (3m,10m,19m) بزيادة إشارة الدخل، بسبب بلوغ حد الإشباع لوجود عدد محدود من أيونات الإيريوم المثارة عند ضخ ثابت، مما يحد من عدد الفوتونات المنبعثة نتيجة عملية الإصدار المحثوث.



الشكل(9).تغيرالطول المثالي لليف المشوب بدلالة الإشارة

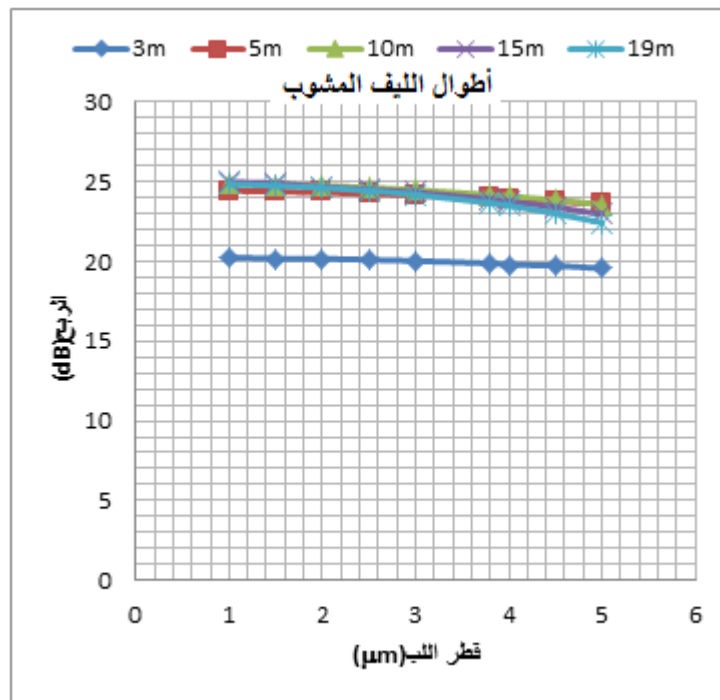
نستنتج من ذلك أن زيادة شدة إشارة الدخل عند الوصول لحد الإشباع لن يزيد من قيمة الريح بل سينقصه.



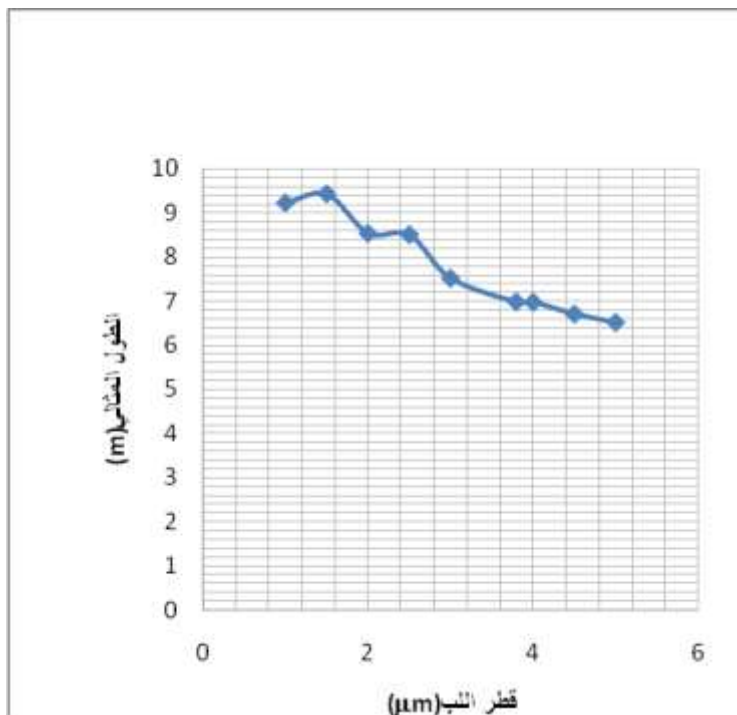
الشكل(10). تغير ربح المضخم بتغيير الإشارة عند عدة أطوال

### ❖ دراسة تغير الطول المثالي بدلالة نصف قطر اللب

قمنا بدراسة تغيير ربح المضخم بتغير نصف قطر اللب مع تثبيت بقية البارامترات (نسبة الإشابة  $8 \times 10^{24} m^{-3}$  وقيمة الضخ  $0.283W$  ، شدة إشارة الدخل  $0.575mW$ )، ثم تم حساب الربح المقابل لقيم نصف القطر بالنسبة لأطوال المضخم  $3m, 5m, 10m, 15m, 19m$ ، كما هو موضح في الشكل (11). ثم تم تحديد قيمة طول الليف المشوب المثالي الذي يعطى أعلى قيمة ربح تابعة لنصف القطر فثنين كما هو موضح في الشكل (12) أن الطول المثالي للمضخم ينقص عند زيادة نصف قطر اللب. يمكن تفسير ذلك بزيادة عدد الذرات المطعمة في المقطع العمودي لليف المضخم مع زيادة نصف القطر (بفرض أن الإشابة متجانسة على كامل القطر)، أي وكأنه تمت زيادة نسبة الإشابة وقد بينا أثر ذلك أعلاه .



الشكل (11):تغير ربح المضخم بتغير نصف قطر اللب



الشكل (12). تغير الطول المثالي للليف المشوب بدلالة نصف قطر اللب

### الاستنتاجات والتوصيات:

يمكن في نهاية هذا العمل استخلاص عدة الاستنتاجات أهمها:

- 1 - إن الطول المثالي للليف المشوب بالأيريديوم يتناسب عكساً مع نسبة الإشابة. يزداد الطول المثالي بزيادة الضخ في البداية ثم يصبح أقل تابعة عند استطاعات ضخ مرتفعة.
- 2 - يقل الطول المثالي للليف بزيادة شدة إشارة الدخل. وكذلك نصف قطر اللب.
- 3 - يمكن الاستفادة من هذه النتائج في صناعة الألياف البصرية المستخدمة في الاتصالات.
- 4 - يجب التأكد تجريبياً من صحة هذه النتائج النظرية آمليين أن يتم ذلك قريباً.
- 5 - نأمل من الشركات المصنعة للمضخمات الليفية المشابهة للأيريديوم أخذ هذه النتائج بعين الاعتبار.

### المراجع

- [1] JOHN M. Weissing, *Doped Fiber Amplifiers*, 2011
- [2] BECKER P. C. ; OLSSON N. A. ; SIMPSON J. R. *Erbium Doped Fiber Amplifier*,  
Lucent Technologies ,1999
- [ 3] YAHYA M. ;Z.; Moustafa H.A. ; OSAMA M. ; AHMED E. *Erbium Doped Fiber Amplifier Performance Using Different Host Materials* 1450-1650 Nm:A  
Comparative Study, IIUM Engineering Journal, Vol. 5, No. 2, 2004
- [4] QIAN W. , *Design and Experimental Characteristics of an Erbium Doped GaN Waveguide*, Thesis for the degree of Master of Science, 2012

- [5] QIAN L., *Experiment on Erbium-Doped Fiber Amplifiers*, Advanced Labs for Special Topics in Photonics (ECE 1640H) University of Toronto, 1998
- [6] SUNITA S. ,*Erbium Fiber Laser Development for Applications in Sensing*, A Thesis for the degree of MASTER OF SCIENCE, 2012
- [7] PAREKHAN M. A. ; BANAZ O. R. ; *Design Optimization for Efficient Erbium-Doped Fiber Amplifiers*, World Academy of Science, Engineering and Technology 22
- [8] HARUN S. W.; TAMCHEKN., POOPALAN P.; AHMAD H.;*High gain L-band Erbium-doped fiber amplifier with two-stage double-pass configuration*, Pramanajournal of physics, Vol. 61, No. 1, 2003
- [9] PERALTA E.; MARNDI A.; RUDY CH. (2010). *Erbium-Doped Fiber Amplifier and Laser*. Optical Society of America.
- [10] JOHNSTONE W. ; CUI SHAW B. ; WALSHB D. , MOODIEB D.; MAUHLIN I. (2000).*Student Laboratory Experiments on Erbium Doped Fiber Amplifiers and Lasers* .Introduction in Sixth International Conference on Education and Training in Optics and Photonics. UK.
- [11] DESURVIRE E. ,SIMPSON J.; BECKER P. (November 1987). *High-gain erbium-doped traveling-wave fiber amplifier*. OPTICS LETTERS .Vol. 12، No. 11