

## تقييم أداء ترميز التوربو في نظم الاتصالات الضوئية

أحمد السيد المصري\*

(تاريخ الإيداع 8 / 8 / 2019. قُبِلَ للنشر في 15 / 1 / 2020)

### □ ملخص □

يتناول هذا البحث دراسة أداء الترميز التوربيني (Turbo Code) بشكل خاص في نظم الاتصالات الضوئية، وذلك لما له من ميزات في كشف وتصحيح الأخطاء في المعلومات المستقبلية وبالتالي تحسين الأداء. قمنا بإجراء محاكاة لوصلة اتصال ضوئي ودراسة تأثير أهم معاملاتنا على الأداء، حيث كان لضياع الليف أثر كبير على الأداء سواء كان هذا التخمين ناتج عن طول الليف أم معامل التخمين. بعدها أجرينا محاكاة للترميز التوربيني ضمن تلك الوصلة ودراسة تأثير أهم معاملات هذا الترميز مثل طول القيد (constraint) وطول المبعثر (Inter-leaver) وعدد مرات الكشف، وقمنا بمقارنته مع الترميز الكتلي (Block Code). وقد وجدنا أنه من المفيد استخدام ترميز التوربو في حال تم العمل عند قيم منخفضة لنسبة الإشارة إلى الضجيج SNR وبالتالي توفير في الإستطاعة المرسله وكذلك التخفيض من كلفة الوصلة.

**الكلمات المفتاحية:** نظم الاتصالات الضوئية، ترميز القناة، ترميز التوربو، نسبة الإشارة إلى الضجيج، معدل خطأ البت.

\*ماجستير - المعهد العالي لبحوث الليزر وتطبيقاته - قسم علوم الليزر - جامعة دمشق.

## Evaluating the performance of Turbo Coding in Optical Communication Systems

Ahmad Alsayed Almasri\*

(Received 8 / 8 / 2020. Accepted 15 / 1 / 2020)

### □ ABSTRACT □

In this research, we will study the performance of The Turbo Code in the optical communication systems, because of its advantages in errors' detection & correction, and as a result improving the performance.

We have simulated an optical communication link and studied the effect of its most important factors, where the loss of the fiber had a significant impact on the performance, whether it was due to the fiber length or its damping factor. Then, we have performed a simulation for the Turbo code within that link and studied the effect of its most important factors, the length of the constraint & the inter-leaver and the number of detection times, and compared it with the Block code.

We found that it is useful to use The Turbo code in the systems that works at low signal-to-noise ratios, and thus saving on sent capacity as well as reducing link cost.

**Key words:** Optical Communication Systems, Channel Coding, Turbo Code, SNR (Signal to Noise Ratio), BER (Bit Error Rate).

---

\* Master - Higher Institute for Laser Research and Applications - Department of Laser Science - University of Damascus

**مقدمة:**

غدت الاتصالات الرقمية وخاصة الضوئية منها حاجة ماسة لكثير من المستخدمين، فأصبحت بذلك عصب الحياة الذي لا غنى عنه ويعزى هذا لما توفره هذه الاتصالات من سرعة ووثوقية وسهولة في تبادل المعلومات. لكن تنامي هذه الاتصالات وانتشارها وتوسعها شكل ضغطاً متزايداً على موارد الاتصالات ولما لهذه الأخيرة من أهمية فقد سعت شركات الاتصالات لاستثمارها على النحو الأمثل وشهدت بذلك تطوراً ملحوظاً فمنذ مطلع السبعينيات من القرن الماضي ظهر تقانات جديدة ومتطورة على صعيد استهلاك الطاقة من جهة والفعالية في استخدام المجال الترددي من جهة أخرى وتنامى ذلك مع ظهور أولى المعالجات المتخصصة في معالجة الإشارة الرقمية والدارات الالكترونية المتكاملة التي ما لبثت أن شهدت بدورها قفزات متسارعة فائقة التطور وما كان لثورة الاتصالات إلا أن سخرت هذه الحداثة فكان لذلك بالغ الأثر وعظيم الفائدة في سرعة و وثوقية الحلول التي تنوعت لتلائم طبيعة التطبيقات المختلفة للاتصالات الضوئية المنتشرة في العالم [8].

نظراً لارتفاع كلفة وصعوبة تعديل أو استبدال شبكات الاتصالات الضوئية لتحقيق متطلبات أكبر، بدأ العمل على تطوير تقنيات تسمح بزيادة الأداء ورفع كفاءة الشبكة دون الحاجة إلى التغيير في الكيان الصلب أو البنية التحتية لشبكة الاتصال، ولما كانت نسبة احتمال الخطأ هي المعيار الأساسي في تقييم الأداء فإن العمل على تخفيض احتمال الخطأ من خلال تطبيق تقنيات كشف الخطأ وتصحيحه تعتبر من أنسب الطرائق لتحسين الأداء، ولا سيما أنها لا تتطلب أي تعديل على بنية المكونات الضوئية في الشبكة، وإنما إضافة بعض المعالجات الرقمية على الإشارة قبل تحويلها إلى الشكل الضوئي.

تعد تقنيات ترميز القناة واحدة من أهم تقنيات كشف الخطأ وتصحيحه ECC [3][11]، حيث يمكن استخدامها في العديد من الشبكات سواء الضوئية أو اللاسلكية أو غيرها... حيث يتم إضافة معلومات مترابطة مع المعلومات المرسله تساعد المستقبل في كشف الخطأ وتصحيحه، فظهرت ترميز مختلفة لكل منها مواصفاتها المختلفة من حيث عدد الأخطاء القادرة على كشفها وتصحيحها والربح الذي تضيفه إلى النظام والتعقيد والكلفة المترتبة على ذلك [2][10].

**مشكلة وأهداف البحث:**

تمتلك نظم الاتصالات الضوئية العديد من المواصفات الجيدة والتي تجعلها الخيار الأول والمفضل أمام مصممي شبكات الاتصال وذلك لمواكبة الاستخدام الكثيف للإنترنت والنمو السريع للاتصالات حول العالم [6]. لكن ظهور أخطاء في استقبال المعلومات المرسله وذلك عند الإرسال لمسافات طويلة وبسرعات كبيرة، مع صعوبة تغيير بنية نظام الاتصالات الضوئي (ليزر، ليف، حساس) من أجل تحسين أداء هذا النظام [8]، تعتبر من أبرز مشاكل هذا النظام.

يهدف هذا البحث إلى العمل على إيجاد مقترح لتحسين أداء هذا النظام دون الحاجة إلى تغيير البنية الأساسية للنظام (ليزر، ليف، حساس) باستخدام رموزات كشف الخطأ وتصحيحه، وذلك عن طريق دراسة أداء نظام اتصالات ضوئي وتأثير معاملات هذا النظام (مثل طول الليف، تخميد الليف، التضخيم الضوئي، رتبة التعديل الرقمي) على الأداء، ومن ثم دراسة تفصيلية لأداء رمز التوربو (Turbo Code) وأهم معاملات ومقارنته مع حالة عدم وجود الترميز ومع أداء المرمز الكتلي (Block Code).

**منهجية البحث:**

نقدم في هذا البحث محاكاة لنظام اتصالات يستخدم الألياف الضوئية، حيث نقوم بإجراء دراسة أداء هذا النظام في حالتين:

الحالة الأولى تكون دون استخدام الترميز المصحح للخطأ، حيث ندرس أثر معاملات الوصلة الضوئية (طول الليف، تخميد الليف، التضخيم الضوئي، رتبة التعديل الرقمي) على أدائها.

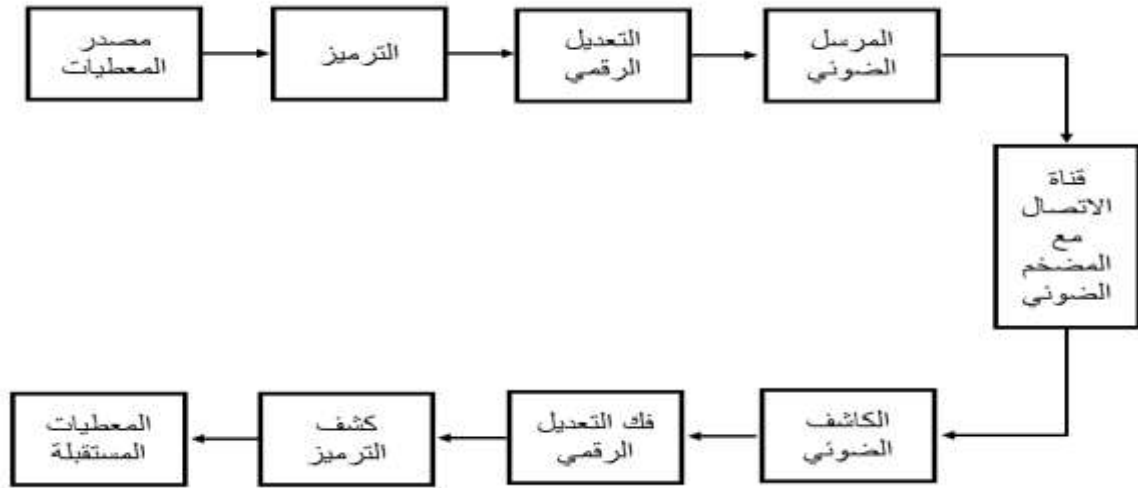
الحالة الثانية تكون مع استخدام الترميز المصحح للخطأ [15]، حيث ندرس تأثير المعاملات الأساسية لترميز التوربو على أداء الوصلة الضوئية، ومن ثم نقوم بمقارنته مع الترميز الكتلي.

ننقل بعدها لإجراء محاكاة لإرسال صورة ثابتة عبر الوصلة الضوئية مع ودون استخدام الترميز المصحح للخطأ. سنقوم بتقييم أداء النظام عن طريق رسم منحنى معدل خطأ البت (BER: Bit Error Rate) بدلالة طاقة إشارة البت إلى كثافة الضجيج Eb/No.

يتم إجراء المحاكاة باستخدام البيئة البرمجية Matlab [9].

**المخطط الصندوقي لوصلة الاتصال [1][4]:**

يبين الشكل (1) مخطط صندوقي لوصلة الاتصال التي تمت محاكاتها:



الشكل (1): مخطط صندوقي لوصلة الاتصال

يتكون النظام المبين في الشكل (1) من المكونات التالية:

1. **مصدر المعطيات:** قد يكون صوت أو صورة أو أية معطيات رقمية وهي عبارة عن سلسلة من البتات.
2. **الرمز:** استخدمت إحدى أنواع الترميز المصححة للخطأ والتي قد تكون توربو (Turbo Code) تستخدم رموزات عنصرية التفاضلية (Convolutional Code) [14]، أو كتلية (Block Code) [10]، سوف ندرس أثر هذه الترميز على أداء الوصلة الضوئية.
3. **معدل رقمي:** هدفه تحويل بتات المعطيات إلى الرموز المرسل لتدخل مرحلة التعديل الضوئي.
4. **التعديل الضوئي:** استخدام المعدل MZM وهو يقوم بتعديل الإشارة الضوئية باستخدام إشارة المعلومات [7]، وفق العلاقة:

$$S_o = \sin\left(\frac{\pi S_i}{2 S_{ref}}\right) \times S_l \dots (1)$$

حيث  $S_i$  إشارة الدخل (كهربائية)

$S_o$  إشارة الخرج (ضوئية)

$S_{ref}$  إشارة مرجعية (كهربائية)

$S_l$  إشارة المنبع الضوئي (ضوئية)

$\times$  عملية الترابط بين الإشارتين الضوئية والكهربائية

5. **المضخم الضوئي:** وظيفته تعويض الضياع الناتج عن تخميد الألياف الضوئية، ورفع طاقة الإشارة الضوئية المستقبلية على دخل الكاشف الضوئي [6][4].
6. **الكاشف الضوئي:** وظيفته تحويل الإشارة الضوئية إلى كهربائية لتتم معالجتها [6].
7. **فاك التعديل الرقمي:** وهو مقابل للتعديل المستخدم في المرسل الضوئي وظيفته تحويل الرموز المستقبلية إلى بتات.
8. **كاشف الترميز:** وهو مقابل للترميز المستخدم في المرسل الضوئي وظيفته كشف البتات المستقبلية بشكل صحيح وتقليل الأخطاء.

### وصف برنامج المحاكاة ضمن بيئة Matlab:

تم تصميم واجهة برمجية ضمن البيئة البرمجية Matlab بهدف تسهيل إجراء عمليات المحاكاة والاختبار، حيث تمكن هذه الواجهة من إجراء محاكاة وصلة اتصال ضوئي في عدة حالات دون ترميز ومع ترميز كتلي ومع ترميز توربو، وإجراء مقارنة بينها، كما يمكن اختبار الوصلة على صورة دون ومع ترميز مصححة للخطأ [9].  
يبين الشكل (2) الواجهة البرمجية للمحاكاة، حيث تتكون من الأقسام الآتية:

1. معاملات الوصلة الضوئية (Fiber Link Parameters): يتم من خلاله إدخال معاملات الوصلة وهي: طول الليف، تخميد الليف، التضخيم الضوئي، رتبة التعديل الرقمي، ومجال نسبة الإشارة إلى الضجيج.

$$P_r(dB) = LL(dB) + G(dB) + P_t(dB) \dots (2)$$

حيث:  $P_t$  الاستطاعة المرسلية

$G$  الربح الكلي للمضخمات على طول الوصلة

$LL$  الفقد الكلي لمكونات الوصلة (ليف، مقسمات، وصلات ...)

$$LL(dB) = L(Km) \times \alpha(dB/Km) + (Cl \times n) + (safety\ margin) \dots (3)$$

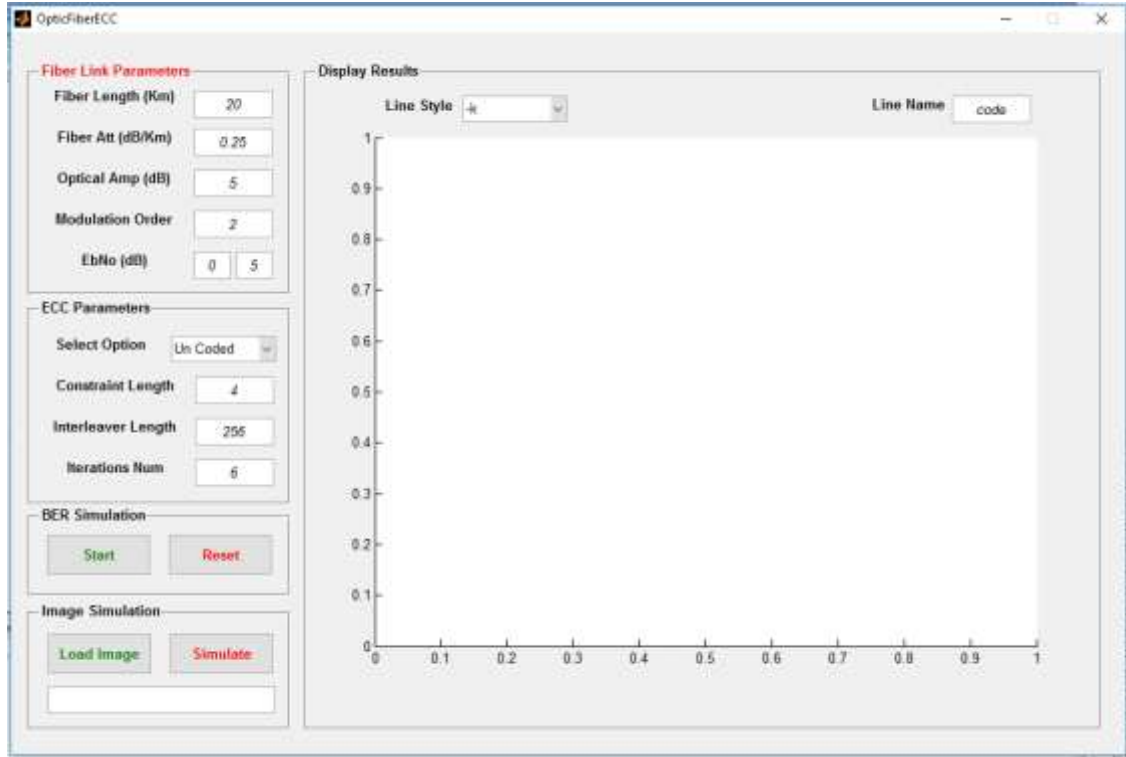
حيث  $L$  طول الليف

$\alpha$  تخميد الليف

$n$  عدد الوصلات

$Cl$  تخميد الوصلات

$safety\ margin$  هامش أمان



الشكل (2): واجهة برنامج المحاكاة

2. معاملات الترميز المصحح للخطأ (ECC Parameters): يتم من خلاله اختيار نوع المحاكاة مع أو دون ترميز وفي حال ترميز نوع الترميز كتلي أو توربو، وفي حال توربو يتم ادخال طول القيد وطول المبعثر وعدد تكرارات كاشف الترميز.
3. إجراء محاكاة الأداء (BER Simulation): يحتوي على زرین الأول لإجراء المحاكاة وفق القيم المدخلة في الأقسام السابقة، والأخر لإعادة القيم إلى الحالة الافتراضية.
4. إجراء الاختبار على صورة (Image Simulation): يحتوي على زرین الأول يتم من خلاله اختيار الصورة ويجب أن تكون من النوع JPG أو PNG لإجراء المحاكاة عليها من خلال الزر الآخر، حيث يقوم هذا الزر بإجراء عملية المحاكاة من أجل الترميز المختار ومقارنة النتيجة مع المحاكاة دون ترميز.
5. إظهار النتائج (Display Results): يتم من خلال هذا القسم إظهار منحنيات الأداء في حالة محاكاة الأداء، وإظهار الصور (الصورة المرسل والمستقبل دون ترميز والمستقبل مع ترميز) ونسبة معدل الخطأ في حالة الاختبار على صورة.

### محاكاة أداء وصلة الاتصال دون ترميز:

فيما يلي نبين منحنيات الأداء (معدل الخطأ في البت BER بدلالة طاقة إشارة البت إلى كثافة الضجيج (Eb/No)، وذلك من أجل عدة معاملات أهمها: رتبة التعديل الرقمي، وتخمين الليف وريح المضخم الضوئي وغيرها...

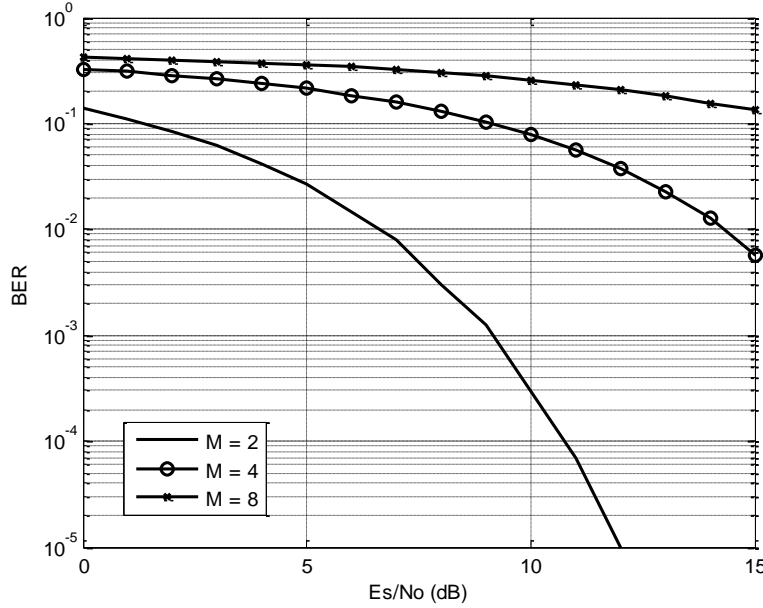
#### 1. دراسة أثر رتبة التعديل:

نستخدم التعديل PSK، ونقوم بتغيير قيمة رتبة التعديل (M) مع المحافظة على باقي قيم المعاملات كما في الجدول (1):

الجدول (1): معاملات الوصلة من أجل رتبة التعديل

20 Km	طول الليف
0.2 dB/Km	معامل التخميد
لا يوجد تضخيم ضوئي	التضخيم الضوئي

فنحصل على الشكل (3):



الشكل (3): منحنيات الأداء من أجل قيم مختلفة لرتبة التعديل

نلاحظ من الشكل (3) أنه بزيادة رتبة التعديل يتراجع الأداء ولذلك نجد أنه إذا استخدمت رتبة تعديل منخفضة نحصل على أداء أفضل، وذلك لأنه كلما زادت رتبة التعديل زاد عدد البتات المرسل في الرمز، بالنتيجة تتخفف الطاقة المخصصة للبت الواحد، ومن جهة أخرى في حال تم كشف الرمز بشكل خاطئ فإن عدد البتات الخاطئة يكون أكبر، ولكن ذلك على حساب معدل إرسال البتات حيث يزداد معدل الإرسال بزيادة رتبة التعديل.

## 2. دراسة أثر تخميد الليف:

يتعلق التخميد الكلي لليف الضوئي المستخدم بمعاملين هما طول الليف ومعامل التخميد، ويزداد التخميد بزيادة كل منهما، ويعطى بالعلاقة:

$$fiber Att = \alpha \times L \dots (4)$$

حيث:  $\alpha$  معامل تخميد الليف dB/Km

L طول الليف Km

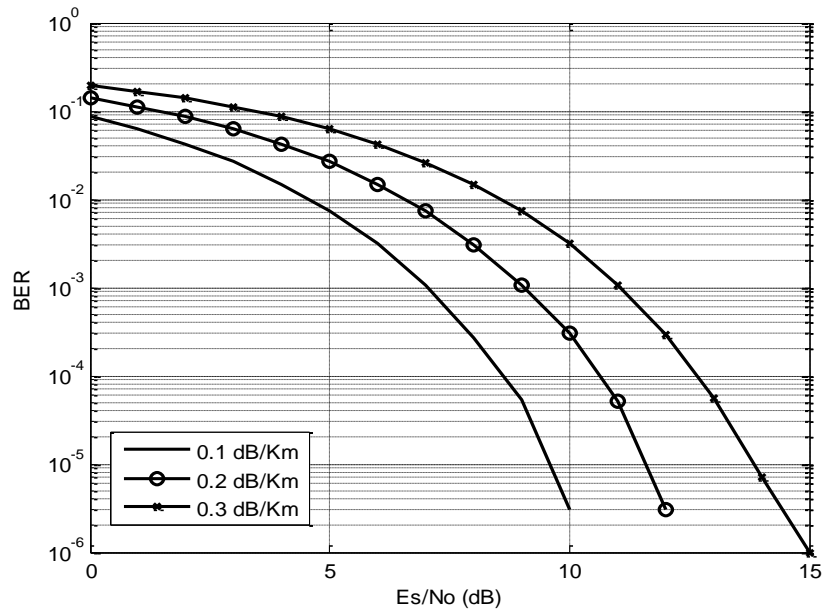
لذلك سوف نقوم في البداية بتغيير معامل تخميد الليف مع المحافظة على باقي قيم المعاملات وفق الجدول (2).

قمنا باختيار  $m=2$  اعتماداً على النتائج التي توصلنا لها في الفقرة 1.6:

الجدول (2): معاملات الوصلة من أجل تخميد الليف

20 Km	طول الليف
M = 2	رتبة التعديل
لا يوجد تضخيم ضوئي	التضخيم الضوئي

فحصل على الشكل (4):



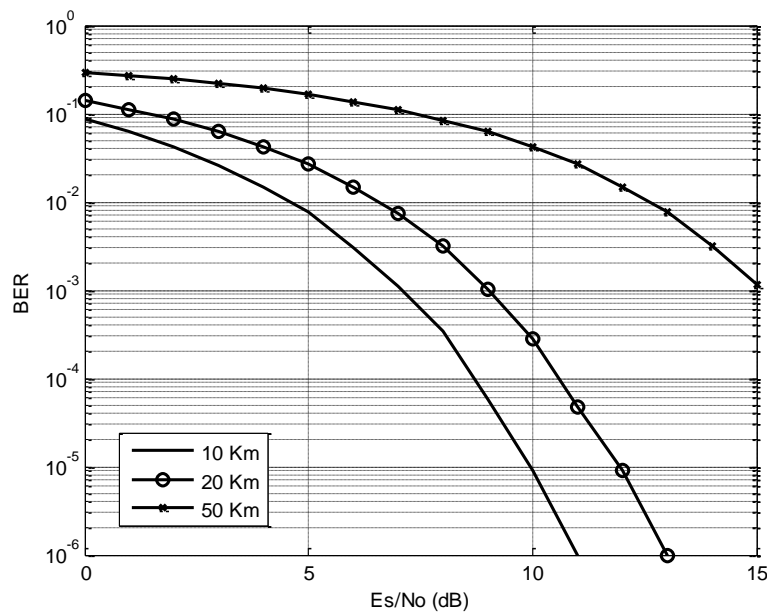
الشكل (4): منحنيات الأداء من أجل قيم مختلفة لتخميد الليف

ثم نقوم بتغيير طول الليف مع المحافظة على باقي قيم المعاملات كما هو في الجدول (3):

الجدول (3): معاملات الوصلة من أجل طول الليف

$M = 2$	رتبة التعديل
$0.2 \text{ dB/Km}$	معامل التخميد
لا يوجد تضخيم ضوئي	التضخيم الضوئي

فحصل على الشكل (5):



الشكل (5): منحنيات الأداء من أجل قيم مختلفة لطول الليف



نلاحظ من الأشكال (4) و (5) أن زيادة طول الليف أو زيادة التخميد تؤدي إلى تراجع الأداء وذلك بسبب زيادة تخميد الليف الضوئي نتيجة انخفاض نسبة الإشارة إلى الضجيج. ولتعويض التخميد في الليف الضوئي عادة يتم استخدام المضخمات الضوئية.

### 3.6. دراسة أثر التضخيم الضوئي:

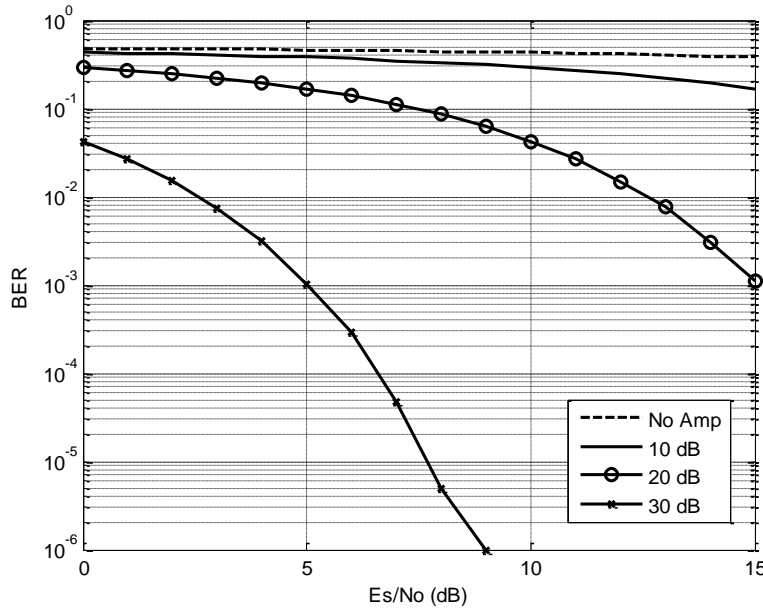
يمكن زيادة طول وصلة الألياف الضوئية أو تحسين الأداء من خلال التغلب على الضجيج في الوصلة باستخدام إما المضخمات الضوئية أو المكررات، تتميز المضخمات بانخفاض كلفتها، أما المكررات تتميز بالأداء الأفضل [4].

نقوم بتغيير ربح المضخم الضوئي مع المحافظة على باقي قيم المعاملات كالتالي:

الجدول (4): معاملات الوصلة من أجل التضخيم الضوئي

$M = 2$	رتبة التعديل
$0.3 \text{ dB/Km}$	معامل التخميد
$100 \text{ Km}$	طول الليف

فنحصل على الشكل (6):



الشكل (6): منحنيات الأداء من أجل قيم مختلفة للمضخم الضوئي

نلاحظ من الشكل (6) أن زيادة التضخيم تسبب تحسن الأداء وهذه النتيجة متوقعة.

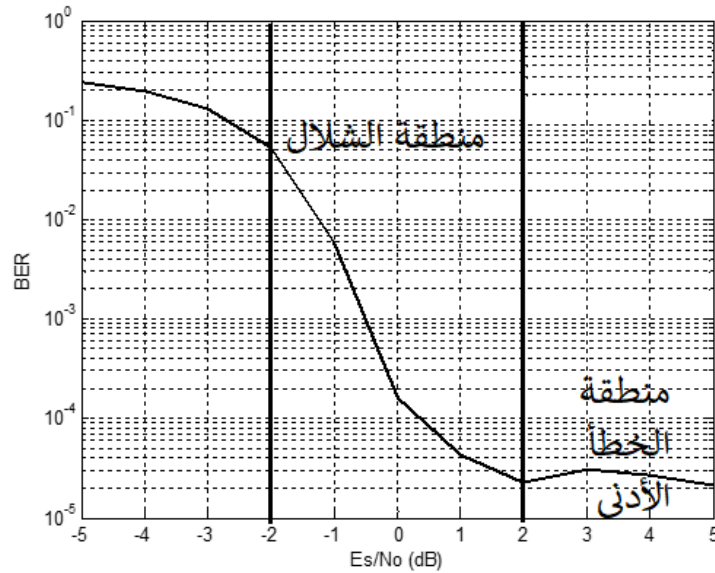
### محاكاة أداء وصلة الاتصال مع ترميز مصحح للخطأ:

سوف نقوم بمحاكاة أداء وصلة الاتصال بوجود ترميز توربو ودراسة أثر تغيير أهم معاملاته على منحنى الأداء، ومن ثم مقارنتها مع الترميز الكتلّي.

#### 1. الشكل العام لمنحنى أداء ترميز التوربو:

يبين الشكل (7) المنحنى العام لأداء الترميز التوربيني [12] حيث نميز منطقتين رئيسيتين هما:

1. **منطقة الشلال:** تمتد من عتبة نسبة الإشارة إلى الضجيج التي يبدأ تقارب كاشف الترميز، وتنتهي عندما تصبح نسبة الإشارة إلى الضجيج كافية لتكون معظم الأخطاء الحاصلة في القناة بسبب الكلمات قليلة الوزن، يحكم أداء الترميز في هذه المنطقة عدد كلمات الترميز ذات الأوزان المنخفضة وتكرار كاشف الترميز.
2. **منطقة الخط الأدنى:** حيث تفقد عملية كشف الترميز التكراري فعاليتها، ويصبح احتمال الخطأ محدود بالمسافة الحرة للترميز.

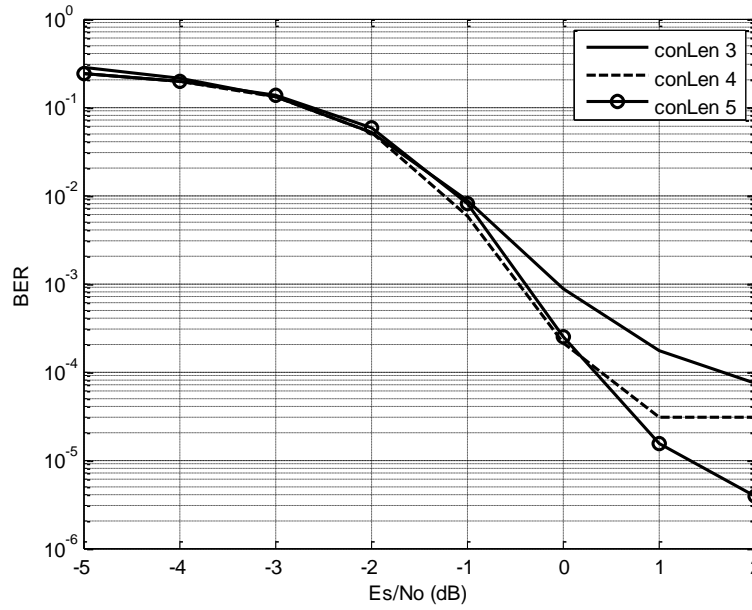


الشكل (7): المنحنى العام لأداء ترميز التوربو

تبين الفقرات الأتية دراسة معاملات ترميز التوربو من النوع Parallel Concatenated Convolutional Code (PCCC) على أداء وصلة الاتصال الضوئية [13].

## 2. دراسة أثر طول القيد:

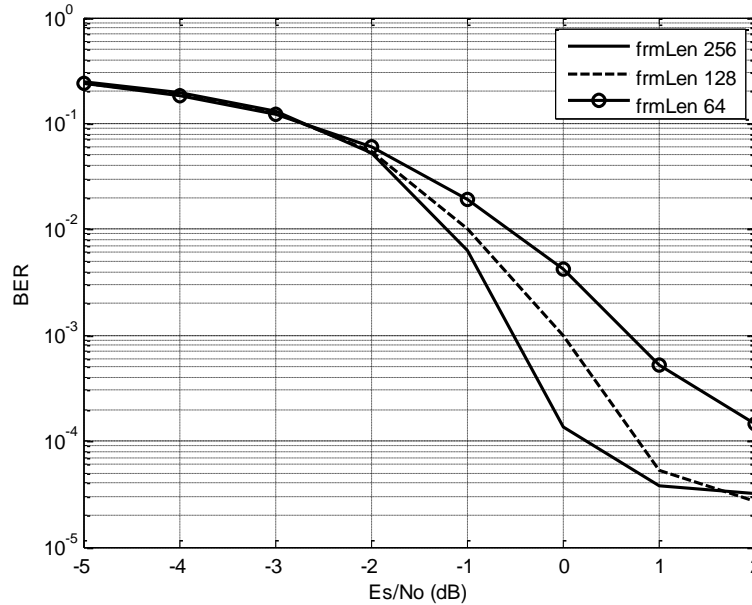
قمنا بتغيير طول القيد للمرمز الإلتقافي العنصري، ومن أجل عدة قيم حصلنا على الشكل (8). يبدو واضحاً تحسن أداء الترميز مع زيادة طول القيد في المرمز الإلتقافي العنصري حيث تؤدي إلى زيادة المسافة الحرة للترميز العنصري وبالتالي لترميز التوربو، وتساعد هذه الزيادة على تحسين الأداء في منطقة الخطأ الأدنى. هذا التحسن في الأداء ينعكس سلباً على تعقيد عملية كشف الترميز لأن تعقيد كشف الترميز يزداد بزيادة طول القيد.



الشكل (8): منحنيات الأداء من أجل قيم مختلفة لطول القيد

## 3. دراسة أثر طول المبعثر:

قمنا بتغيير طول المبعثر، ومن أجل عدة قيم حصلنا على الشكل (9).

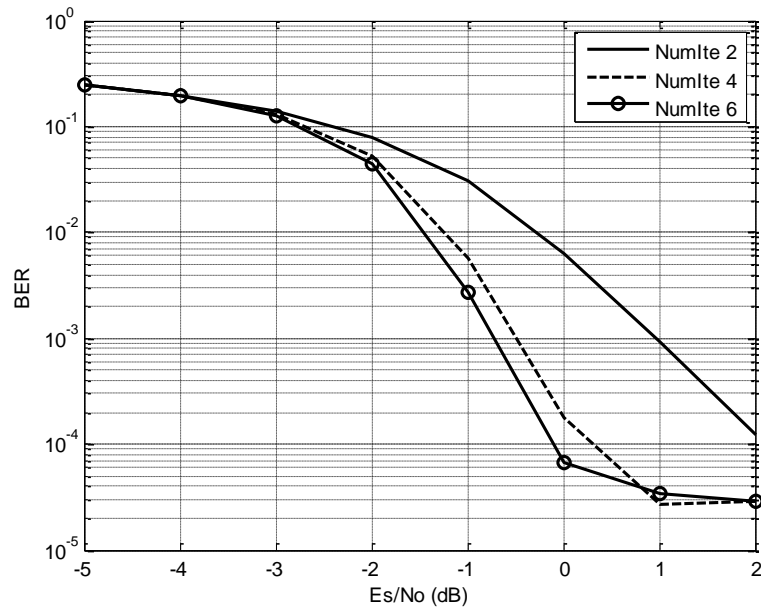


الشكل (9): منحنيات الأداء من أجل قيم مختلفة لطول المبعثر

نلاحظ من الشكل (9) أن الأداء يتحسن بزيادة طول المبعثر لأن زيادة طول المبعثر تلعب دوراً إيجابياً في إنقاص احتمال إصدار كلمات الترميز قليلة الوزن، وبالتالي تزداد المسافة الحرة للترميز [12] ويتحسن الأداء.

## 4. دراسة أثر عدد مرات الكشف:

قمنا بتغيير عدد مرات الكشف، ومن أجل عدة قيم حصلنا على الشكل (10).

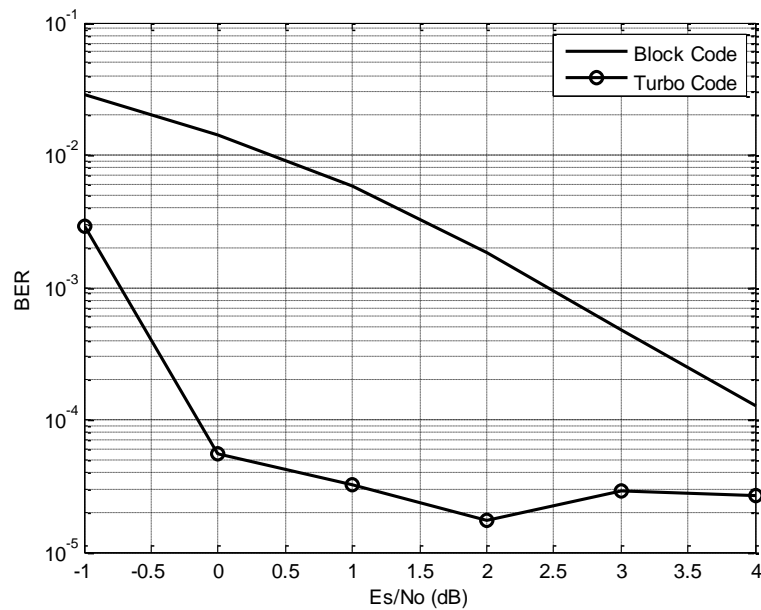


الشكل (10) منحنيات الأداء من أجل قيم مختلفة لعدد مرات الكشف

يوضح الشكل (10) كيف أن زيادة تكرار كاشف الترميز تسهم في تحسين أداء ترميز التوربو [13] حيث تساهم في تضيق منطقة الشلال والوصول بسرعة أكبر إلى منطقة الخطأ الأدنى. كما أن منحنيات الأداء تتقارب من بعضها أكثر بزيادة عدد مرات الكشف وذلك لأن الفرق في المعلومات الزائدة التي تنتج عن تكرار الكشف يقلص.

#### مقارنة بين ترميز التوربو والترميز الكتلي:

قمنا بمقارنة أداء مرمز التوربو ذو طول قيد 4 وطول مبعثر 256 وعدد مرات تكرار الكشف 8 مع مرمز كتلي (7,4) ومع أداء الوصلة دون ترميز، فحصلنا على الشكل (11).



الشكل (11): مقارنة أداء ترميز التوربو والترميز الكتلي

نلاحظ من الشكل (11) أن أداء مرمز التوربو يتغلب على المرمز الكتلي من أجل نسب إشارة إلى الضجيج منخفضة وذلك لأن الترميز التوربيني مصمم للعمل عند نسبة إشارة إلى ضجيج منخفضة، ونلاحظ أيضاً أن أداء مرمز التوربو يتقارب من أداء الترميز الكتلي بازدياد نسبة الإشارة إلى الضجيج [5].

### نتيجة:

من خلال ما سبق نجد أنه باستخدام مرمز توربو بطول قيد وطول مبعثر وعدد تكرارات الكشف أكبر ما يمكن نحصل على أفضل أداء [5] ولكن على حساب كلفة وتعقيد وزمن ترميز أكبر لذلك فإن تصميم الوصلة الضوئية يفرض قيود تحد من تلك المعاملات، وبالأخص أنه بعد حد معين من القيم لتلك المعاملات يتقارب الربح المكتسب جراء تلك الزيادة.

في الأنظمة العملية يتم العمل عند نسبة إشارة إلى الضجيج 10 - 15 dB وبوجود ترميز كتلي، في حين استخدام ترميز توربو بمواصفات ضمن التي تمت محاكاتها يمكننا من العمل عند نسبة إشارة إلى الضجيج 2 dB.

### 9. اختبار أداء مرمز التوربو على صورة:

في البداية يتم اختيار قيم المحاكاة المبينة في الجدول (5):

الجدول (5): معاملات الوصلة من أجل المقارنة

2	رتبة التعديل
0.27 dB/Km	معامل التخميد
No Amp	التضخيم الضوئي
200 Km	طول الليف
3 dB	نسبة الإشارة إلى الضجيج
4	طول القيد
128	طول المبعثر
4	عدد تكرار الكشف

وبإجراء المحاكاة على الصورة نحصل على الأشكال التالية:



الشكل(12): الصورة المرسلية



الشكل (13): الصورة المستقبلية دون ترميز



الشكل (14): الصورة المستقبلية مع ترميز كتلي



الشكل (15): الصورة المستقبلية مع ترميز توربو

حيث نلاحظ من الأشكال السابقة أن أفضل أداء هو عند استخدام الترميز التوربيني [10] حيث حصلنا على  $BER = 5.086 * 10^{-6}$  مقارنة مع الترميز الكتلي حيث حصلنا على  $BER = 0.0005$  ومقارنة مع عدم استخدام ترميز حيث حصلنا على  $BER = 0.4998$ .

وهذه النتيجة متوقعة كما بينت دراسة الأداء السابقة. كما نلاحظ أن الصورة في حالة ترميز التوربو تحتوي على أخطاء يمكن تمييزها بالعين، ولزيادة جودة الصورة وتقليل عدد الأخطاء يمكن التغيير في معاملات ترميز التوربو كما بينت دراسة الأداء السابقة حيث وجدنا أن الأداء يتحسن بزيادة طول المبعثر أو طول القيد أو عدد تكرار كاشف الترميز. نقوم فيما يلي بتغيير عدد تكرار كاشف الترميز مع المحافظة على باقي القيم كما هي في الجدول (5):



الشكل (16): الصورة المستقبلية مع عدد تكرار كاشف الترميز 1



الشكل (17): الصورة المستقبلية مع عدد تكرار كاشف الترميز 2



الشكل (18): الصورة المستقبلية مع عدد تكرار كاشف الترميز 4



الشكل (19): الصورة المستقبلية مع عدد تكرار كاشف الترميز 8

حيث نلاحظ أن عدد الأخطاء الممكن تميزها ينخفض ويتحسن الأداء بزيادة عدد تكرار كاشف الترميز، حيث تظهر بعض الأخطاء من أجل عدد تكرار كاشف الترميز 2، ومن أجل عدد تكرار كاشف الترميز 4 نلاحظ أن عدد الأخطاء

انخفض بشكل ملحوظ في حين من أجل عدد تكرار كاشف الترميز 8 لم نعد قادرين على تمييز وجود أخطاء حيث بلغت  $BER = 5 \times 10^{-6}$ .

ولكن هذا التحسن في الأداء على حساب تعقيد كاشف الترميز وزمن الكشف حيث يزداد بزيادة عدد تكرار كاشف الترميز.

### الاستنتاجات والتوصيات:

احتوى هذا البحث في البداية على دراسة أداء نظام الاتصالات الضوئي الذي أنشأناه باستخدام Matlab دون استخدام الترميز وذلك من أجل عدة معاملات: رتبة التعديل الرقمي، طول وتخميد الليف، وريح المضخم الضوئي، وتوصلنا إلى النتائج الآتية:

- زيادة رتبة التعديل يتراجع الأداء و إذا تم استخدام رتبة تعديل منخفضة نحصل على أداء أفضل، ولكن ذلك على حساب معدل إرسال البتات حيث يزداد معدل الإرسال بزيادة رتبة التعديل.
- زيادة طول الليف أو معامل تخميده تؤدي إلى تراجع الأداء وذلك بسبب زيادة تخميد الليف الضوئي وبالتالي انخفاض نسبة الإشارة إلى الضجيج.
- زيادة التضخيم تسبب تحسن الأداء، و عادة يتم استخدام المضخمات الضوئية لتعويض التخميد في الليف الضوئي.
- ثم قمنا بمحاكاة نظام الاتصالات الضوئي مع وجود مرمز التوربو من أجل عدة معاملات: طول القيد، طول المبعثر، تكرار عدد مرات الكشف، ومن ثم قمنا بمقارنته مع أداء المرمز الكتلي ووجدنا مايلي:
- تحسن أداء ترميز التوربو مع زيادة طول القيد في المرمز الالتفافي العنصري، ولكن هذا التحسن في الأداء ينعكس سلباً على تعقيد عملية كشف الترميز لأن تعقيد كشف الترميز يزداد بزيادة طول القيد.
- الأداء يتحسن بزيادة طول المبعثر لأن زيادة طول المبعثر تلعب دور إيجابي في انقاص احتمال إصدار كلمات الترميز قليلة الوزن، وبالتالي تزداد المسافة الحرة للترميز.
- زيادة تكرار كاشف الترميز تسهم في تحسين أداء ترميز التوربو، ولكن منحنيات الأداء تتقارب من بعضها أكثر بزيادة عدد مرات الكشف وذلك لأن الفرق في المعلومات الزائدة التي تنتج عن تكرار الكشف ينقلص.
- أداء مرمز التوربو يتغلب على المرمز الكتلي [5] من أجل نسب إشارة إلى الضجيج منخفضة، ومن ثم يتقارب الأداء بازدياد نسبة الإشارة إلى الضجيج، وكلا الترميزين أفضل من حالة عدم استخدام ترميز عند العمل عند نسبة إشارة إلى ضجيج منخفضة أقل من 5 dB.
- من خلال ما سبق نجد أنه في الأنظمة التي تعمل بنسبة إشارة إلى الضجيج منخفضة يمكن إضافة مرمز التوربو لتحسين أداء النظام دون الحاجة إلى استبدال المنبع الضوئي أو الليف أو إضافة مضخمات، ويمكن تحسين الأداء أكثر باستخدام طول قيد وطول مبعثر وعدد تكرارات الكشف أكبر لهذا المرمز ولكن على حساب كلفة وتعقيد وزمن ترميز أكبر، لذلك فإن تصميم الوصلة الضوئية يفرض قيوداً تحد من تلك المعاملات، وبالأخص أنه بعد حد معين من القيم لتلك المعاملات يتقارب الريح المكتسب جراء تلك الزيادة.



**Reference:**

- [1] WINZER P. J. and, NEILSON D. T. and, CHRAPLYVY A. R. "Fiber-optic transmission and networking: the previous 20 and the next 20 years" OPTICS EXPRESS, Vol. 26, No. 18, 3 Sep 2018.
- [2] MATTOUSSI F, KHALIGHI M.A, and BOURENNANE S. "Improving the performance of underwater wireless optical communication links by channel coding" Applied Optics, Vol. 57, No. 9, 20 March 2018.
- [3] Djordjevic I. B. "Channel Coding for Optical Transmission Systems" OptoElectronics and Communications Conference, IEEE, 2017.
- [4] SIMON J.C. and, BRAMERIE L. "All Optical Regeneration Techniques" ENSSAT / Université de Rennes, Jan 2018.
- [5] R. Leoraj and J. Arputha Vijaya Selvi, Comparative performance analysis of forward error correcting codes for Free Space Optical communication, 2016 International Conference on Emerging Trends in Engineering, Technology and Science (ICETETS), IEEE, 2016.
- [6] Senior. J. M., Optical Fiber Communications Principles and Practice, 3rd, PERSON Prentice Hall, 2009.
- [7] P. Winzer, and R. Essiambre, Advanced Optical Modulation Formats, Proceeding of the IEEE, Vol.49. no.5, 2006.
- [8] G. Keiser, Optical Fiber Communication, McGraw Hill Education, New York, 2011.
- [9] L. N. Binh, Optical Fiber Communication System with Matlab and Simulink Models, 2ed, CRC Press, 2015.
- [10] S. Benedetto and G. Bosco, Channel Coding for Optical Communications, In: Forestieri E. (eds) Optical Communication Theory and Techniques, Springer, Boston, MA, 2005.
- [11] W. E. Ryan and S. Lin, Channel Codes Classic and Modern, Cambridge University Press, 2009.
- [12] C. Heegard and S. B. Wicker, Turbo Coding, Kluwer Academic Publishers, 2001.
- [13] B. Vucetic and J. Yaun, Turbo Codes: Principles and Applications, Kluwer Academic Publishers, 2000.
- [14] Wu, Yufei and Implementation of Serial and Parallel Concatenated Convolutional Codes, PHD Dissertaton, Virginia Polytechnic and State University, May 2000.
- [15] Azadet K. and Yu K. Forward Error Correction (FEC) techniques for optical communications, Lucent Technologies, IEEE 802.3 High-Speed Study Group Plenary meeting, Montreal, July 1999