

Study and Evaluation of the Performance of some Effective Wavelengths in Optical Wireless Communication Lasers

Dr. Bassam Ghazoleen*
Tarek Madi**

(Received 10 / 2 / 2023. Accepted 13 / 8 /2023)

□ ABSTRACT □

This experimental study focuses on evaluating the performance of wavelength 850 nm and wavelength 1250 nm, in terms of the maximum damping that can be worked on by simulating an optical wireless communication link (transmitter - channel - receiver).

In the beginning, we conducted a theoretical study of the structure of the optical wireless communication system in general, and laser transmitters in particular.

After that, it was proposed to design the studied link and perform the necessary simulations to evaluate the performance with changing the link parameters (channel length and channel damping coefficient) for each of the two studied wavelengths, which are (850-1250 nm), which are the wavelengths of the transmission windows used in optical wireless communications, and then the results were compared to select the best wavelength.

The study showed that the performance of the 850 nm wavelength is superior to the performance of the 1250 nm wavelength in terms of the maximum damping at which it can work with acceptable link performance, and it is superior in terms of the maximum channel length at which the link operates when the damping coefficient is constant.

Keywords: Wireless optical communication, Laser attenuation – BER– Quality factor, channel absorption and scattering loss , LED

Copyright



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

* Associate Professor- Faculty of Science- Tishreen University- Lattakia- Syria.

**Postgraduate Student (Master)- Faculty of Science- Tishreen University- Lattakia- Syria.
tarekmadi@gmail.com

دراسة وتقييم أداء بعض الأطوال الموجية الفعالة في ليزرات الاتصالات اللاسلكية الضوئية

د. بسام غزولين*

طارق ماضي**

(تاريخ الإيداع 2023 / 2 / 10. قُبل للنشر في 2023 / 8 / 13)

□ ملخص □

تركز هذه الدراسة التجريبية على تقييم أداء الطول الموجي 850 nm والطول الموجي 1250 nm، من حيث التخميد الأعظمي الذي يمكن العمل عنده من خلال محاكاة لوصلة اتصال لاسلكي ضوئية (مرسل - قناة - مستقبل)، حيث أجرينا في البداية دراسة نظرية لبنية نظام اتصالات اللاسلكية الضوئية بشكل عام ومرسلات ليزرية بشكل خاص. وتناولت هذه الدراسة أهم المنغصات التي تتعرض لها الإشارة الضوئية أثناء انتشارها. بعد ذلك تم اقتراح تصميم للوصلة المدروسة وإجراء المحاكاة اللازمة لتقييم الاداء مع تغيير معاملات الوصلة (طول القناة ومعامل تخميد القناة) لكل من طولي الموجة المدروسة وهي (850-1250 nm) وهي الأطوال الموجية لنواذ الإرسال المستخدمة في الاتصالات اللاسلكية الضوئية، وبعدها تمت مقارنة النتائج لتحديد الطول الموجي الأفضل. وبيّنت الدراسة أن أداء الطول الموجي 850 nm يتفوق على أداء الطول الموجي 1250 nm من حيث التخميد الأعظمي الذي يمكن العمل عنده بأداء وصلة مقبول، ويتفوق من حيث طول القناة الأعظمي الذي تعمل عنده الوصلة عند ثبات معامل التخميد.

الكلمات المفتاحية: الاتصالات اللاسلكية الضوئية، تخميد الليزر، معدل خطأ البت، معامل الجودة، فقد التبعثر وفقد امتصاص القناة، الثنائيات الباعثة للضوء

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



CC BY-NC-SA 04

* استاذ مساعد - كلية العلوم - جامعة تشرين - اللاذقية - سورية.

** طالب ماجستير - كلية العلوم جامعة تشرين - اللاذقية - سورية. tarekmadi@gmail.com

مقدمة:

تعاني الاتصالات الراديوية التقليدية من العديد من القيود التي تحد من إمكانيات هذه الاتصالات لعل أهمها المحدودية في عرض القناة والسعة ومعدل الإرسال والمجال الترددي، وبالتالي لن تستطيع مع مرور الوقت على تلبية الحاجات المتزايدة من الطلب على معدلات إرسال أعلى وخدمات أكثر. لذلك يتم العمل على إيجاد تقنيات وحلول بديلة أو مكملية مثل تقنيات التعديل والترميز المتقدمة والهوائيات المتعددة وغيرها...

يعد تحقيق معدلات بيانات عالية جداً من مرتبة 10 Gbps باستخدام النطاق الترددي للأنظمة الراديوية أمراً صعباً. تعتبر أنظمة الاتصالات اللاسلكية البصرية مرشحة للحصول على معدلات بيانات عالية للربط بين المستخدمين وشبكة الوصول. وعلى الرغم من أنه بدأ العمل على تطوير وتنفيذ هذه التقنية لأكثر من ثلاثة عقود سابقة كحل بديل لدعم البيانات عالية السرعة بدلاً من أنظمة الاتصالات الراديوية. ومع ذلك، لم يتم نشر هذه التقنية حتى تسعينيات القرن الماضي عندما أصبحت مكونات المرسل والمستقبل متوفرة بتكلفة منخفضة. من المتوقع ازدياد معدل الاعتماد على هذه التقنية وذلك بسبب تطور تقنيات تصنيع المنابع الضوئية باستخدام أنصاف النواقل.

أهمية البحث وأهدافه:**هدف البحث**

يهدف البحث إلى دراسة وتقييم أداء الطولين الموجيين 850 nm, 1250 nm لليزرات المستخدمة في الاتصالات اللاسلكية الضوئية والمستخدم في أنظمة الاتصالات الحديثة (IoT,5G). حيث يتم التقييم من خلال دراسة معاملات أداء وجودة الاتصال مع تغيير كل من تخميد وصلة الاتصال وطولها. بهدف تحديد الأنسب لهذا النوع من الاتصالات.

أهمية البحث

تكم أهمية البحث في إجراء دراسة مرجعية ومقارنة تجريبية باستخدام المحاكاة الحاسوبية لوصلة اتصال لاسلكي ضوئي (مرسل - قناة - مستقبل) من خلال برنامج المحاكاة OptiSystem. وذلك لما لهذه التقنية من ميزات لعل أهمها:

- تشكل حل فعال لتحقيق متطلبات وانتشار شبكات انترنت الأشياء والاتصالات الخلوية
- تركيب النظام سهل ولا يحتاج الى وقت كبير وإمكانية إعادة استخدامه في أماكن أخرى
- عرض نطاق ترددي كبير ومعدل نقل بيانات عالٍ
- استهلاك طاقة قليل مقارنة مع الاتصالات الراديوية
- تجهيزات صغيرة الحجم
- ليست هناك حاجة للحصول على ترخيص الطيف

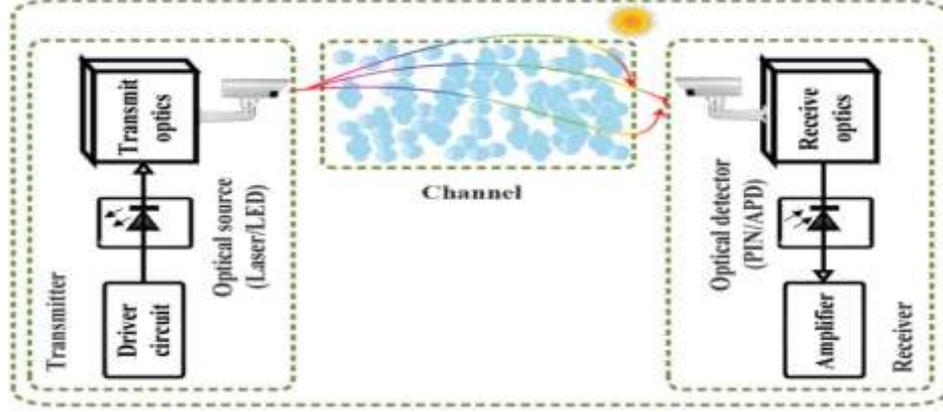
طرائق البحث ومواده:

تم في هذا البحث من خلال إجراء دراسة نظرية عن الاتصالات اللاسلكية الضوئية بشكل عام ومكوناتها بشكل خاص ومن ثم إجراء دراسة نظرية عن قناة الاتصال اللاسلكي الضوئي من حيث الظواهر الجوية وألية تأثيرها على انتشار الأمواج الضوئية الليزرية، ودراسة النماذج الرياضية والاحصائية التي توصف تلك الظواهر. لتتم بعدها المحاكاة لوصلة

اتصال ضوئي لاسلكي أخذين بعين الاعتبار معاملات المرسل الضوئي للليزري ومعاملات قناة الاتصال، وإجراء التغيير اللازم في المعاملات السابقة ودراسة أثرها على أداء الاتصال. وتحليل ومناقشة النتائج.

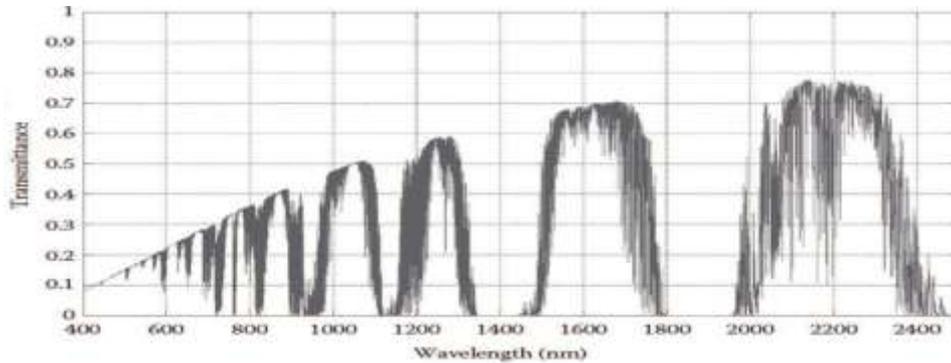
1- البنية العامة لنظام اتصال لاسلكي ضوئي

يبين الشكل (1) [1] البنية العامة لنظام اتصال ضوئي لاسلكي، حيث يتكون من مرسل ومستقبل وقناة اتصال. يقوم مصدر المعلومات بتوليد المعلومات على شكل أمواج كهربائية يتم استخدامها لتعديل الإشارة الضوئية الصادرة عن المنبع الضوئي ليقوم المرسل بإرسالها عبر القناة، يقوم الكاشف الضوئي بتجميع الإشارات الضوئية وتحويلها إلى تيار كهربائي يتم استخلاص المعلومات منه.



الشكل (1) البنية العامة لنظام اتصال ضوئي لاسلكي [1]

في أغلب الأحيان لا تصل نسخة طبق الاصل من المعلومات المرسله إلى المستقبل وإنما تحتوي على بعض الأخطاء الناتجة عن الضياع ضمن القناة. والذي يحد بشكل أساسي من أداء هذه الأنظمة. يعود سبب الضياع في قناة الاتصال بشكل أساسي إلى الآثار الناتجة عن الانتثار والامتصاص التي تحدث بواسطة الجزيئات والغبار الموجود في الجو على طول مسار الاتصال. وبالتالي فإن الانتثار والامتصاص التابع لطول الموجة هما المكونان الرئيسيان للضياع. ونظرًا لكون الامتصاص تابع لطول الموجة، فهناك مجموعة من النوافذ ذات الطول الموجي التي تواجه الحد الأدنى من الامتصاص نسبيًا. هذه النوافذ مبينة في الشكل (2) [1].



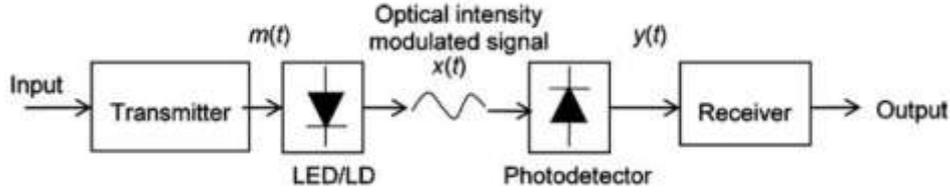
الشكل (2) نوافذ الإرسال في أنظمة الاتصالات الضوئية اللاسلكية [1]

بشكل عام ، يتراوح طول الموجة المستخدمة في أنظمة الاتصالات الضوئية اللاسلكية ضمن المجالات: [780 – 850] nm ، [1520 – 1600] nm وذلك كون الامتصاص الناتج عن الجزيئات عند هذه الأطوال الموجية يكون أصغرياً. مما يساهم في تخفيف ضياع الغلاف الجوي. بالإضافة إلى أن بعض الأطوال الموجية المتمركزة حول الأطوال الأربعة التالية (850,1060,1250,1550) nm تتمتع بتخميد من رتبة 0.2 dB/Km . ولحسن الحظ أن الأطوال الموجية (850,1550) nm هي نفسها المستخدمة في أنظمة الاتصالات بالألياف الضوئية مما يتيح لنا استخدام تجهيزات الإرسال والاستقبال ذاتها.

تتميز النافذة 850 nm بتخميد منخفض ومناسبة لأنظمة FSO (Free Space optical) بالإضافة إلى أن مكونات المرسل والمستقبل ذات الموثوقية والعالية الأداء والمنخفضة الكلفة متوفرة بشكل عام وشائعة الاستخدام حيث يمكن استخدام مرسل ليزري من النوع VCSEL وكاشف ضوئي من النوع APD.

تتميز النافذة 1250 nm بتخميد منخفض، لكن أجهزة الإرسال التي تعمل في نطاق الطول الموجي هذا نادرة. تتوفر مرسلات ليزرية ذات طاقة منخفضة والتي تعمل عادةً ضمن المجال [1280–1310] nm تجارياً. مع ذلك ، يزداد التخميد الجوي بشكل كبير عند الطول الموجي 1290 nm.

تعد تقنيتي تعديل الكثافة مع الكشف المباشر الطريقة الفعلية لتنفيذ الأنظمة اللاسلكية البصرية وذلك بسبب انخفاض تكلفتها وتعقيدها. حيث تدعى هذه الأنظمة بـ (IM/DD OWC)، يبين الشكل (3) مخطط صندوقي لنظام IM/DD OWC [6].



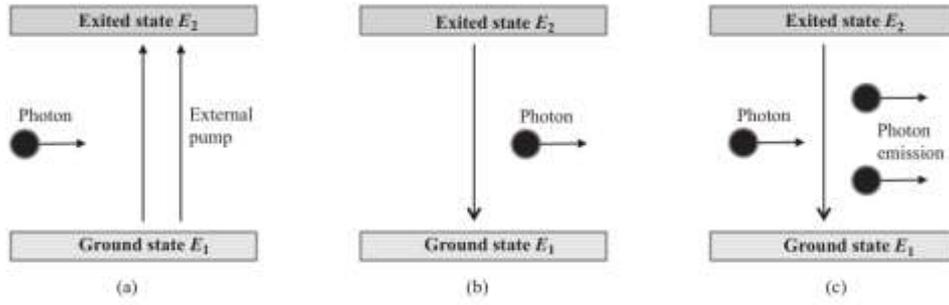
الشكل (3) مخطط صندوقي لنظام IM/DD OWC [6]

في البداية يتم تعديل تيار قيادة المصدر الضوئي مباشرة باستخدام إشارة التعديل ، والتي بدورها تغير شدة المصدر الضوئي أي أن الاستطاعة الضوئية المرسله تتناسب مع تيار قيادة المصدر الضوئي. يستخدم المستقبل الكاشف الضوئي الذي يقوم بتجميع الأمواج الضوئية وتوليد تيار ضوئي يتناسب مع شدة الاستطاعة الضوئية اللحظية الواردة إليه [4]. نهتم من خلال البحث بالمرسلات الليزرية بشكل خاص لذا نعرض في الفقرة التالية المرسلات الليزرية.

2- المرسلات الليزرية

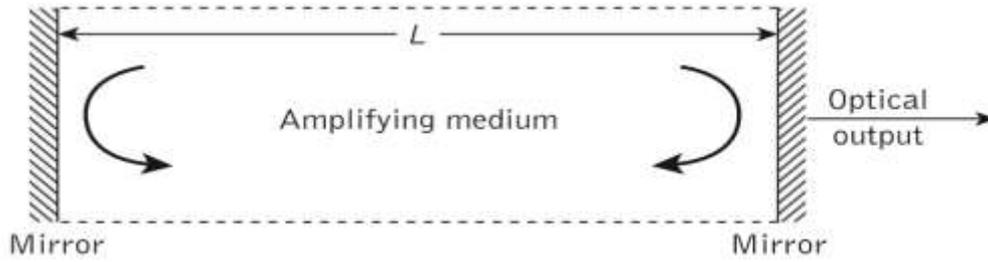
تتفاعل المادة مع الضوء (الفوتونات) وفق إحدى الحالات الثلاثة الآتية (الشكل 4) [2]:

- الإمتصاص (Absorption): ورود فوتون يؤدي إلى إنتقال إلكترون.
- الإصدار التلقائي (Spontaneous Emission) : إنتقال إلكترون يؤدي إلى إصدار فوتون.
- الإصدار المحثوث (Stimulated Emission): : ورود فوتون يؤدي إلى إنتقال إلكترون وإلى إصدار فوتون جديد.



الشكل (4) (a) امتصاص (b) اصدار تلقائي (c) اصدار محثوث [2]

يبين الشكل (5) البنية الأساسية لليزر [2].



الشكل (5) البنية الأساسية لليزر [2]

حيث يتكون من ثلاث اجزاء اساسية وهي:

- **الوسط المضخم:** وسط يحتوي عدد من الذرات بعضها في السوية الأساسية وليكن عددها N ، وبعضها الآخر في السوية المثارة وليكن عددها N^* . إذا عبرت حزمة ضوئية تتمتع بتواتر فإن امتصاص الفوتونات يتناسب طردياً مع N وإن اصدار الفوتونات بالاصدار المحثوث يتناسب طردياً مع N^* . وبالتالي في حال كان $N^* > N$ فإن عدد الفوتونات الناتجة أكبر من عدد الفوتونات التي جرى امتصاصها وعندما تزداد شدة الحزمة الضوئية بعد عبورها الوسط ونقول ان الوسط مضخم ، أما في حال $N^* < N$ فإن عدد الفوتونات الناتجة أصغر من عدد الفوتونات التي جرى امتصاصها وعندما تنقص شدة الحزمة الضوئية بعد عبورها الوسط ونقول ان الوسط غير مضخم ولا يصلح لتوليد الليزر.
- **حجرة التضخيم:** نعتمد على الفكرة السابقة لتوليد الليزر، حيث نقوم بإعادة تمرير الحزمة في الوسط المضخم مرات عديدة ووفق المنحى نفسه، وكلما مرت الحزمة في الوسط فإنها تتسبب في إصدارات محثوثة جديدة تتفق مع الحزمة بالاتجاه ومع الفوتونات بالتواتر والطور مما يزيد من طاقة الحزمة ويضخمها، حيث نستمر بإعادة تمرير الحزمة حتى نحصل على استطاعة كافية، للقيام بذلك نضع الوسط المضخم بين مرآتين (كما في الشكل 5) حيث تسمح كل منهما للحزمة بالانعكاس من جديد باتجاه الوسط المضخم ونجعل عاكسية إحدى المرآتين كاملة بينما عاكسية المرآة الثانية تكون جزئية مما يسمح بتمرير جزء من الحزمة ضوئية إلى الوسط الخارجي ويشكل الحزمة الليزرية.
- **الضخ:** لما كان الاصدار المحثوث يعيد الذرات إلى السوية الأساسية، فإنه لضمان تحقق الشرط $N^* > N$ (أي لبقار الوسط مضخماً) لابد من مؤثر خارجي على الوسط المضخم يقوم بتقديم الطاقة إلى الوسط المضخم مما يؤدي إلى إثارة الذرات ويعوض عن انتقال الذرات إلى حالة الطاقة الأساسية نتيجة الاصدار المحثوث [4,5] تتمتع حزمة الليزر بالخواص الآتية:

- وحيدة اللون، أي أن جميع الفوتونات لها نفس التواتر.
- مترابطة بالطور، أي جميع الفوتونات الناتجة عن الاصدار المحثوث تتمتع بطور الفوتون الذي حثها.
- انفراج الحزمة الليزرية صغير أي لا يتوسع مقطع الحزمة كثيراً (على عكس الثنائيات المشعة) عند الابتعاد عن منبع الليزر.

3- أشكال الضياعات الجوية

3-1- الضياعات بسبب الامتصاص والتبعثر

عند استخدام الأطوال الموجية المرئية وتحت الحمراء يكون عامل الامتصاص الأساسي هو جزيئات الماء في الهواء، ثاني أكسيد الكربون، والأوزون. يمكن قياس التخميد الذي تعانيه الإشارة الضوئية عندما تمر عبر الغلاف الجوي بالاعتماد على الطاقة الواصلة عند المستقبل P_R والطاقة المرسل P_T . تعطى علاقة نفوذية الغلاف الجوي T_a بالعلاقة التالية:

$$T_a = \frac{P_R}{P_T} \dots (1)$$

تعتبر علاقة نفوذية الغلاف الجوي عن معدل الطاقة المستقبلية بالنسبة للطاقة المرسل. ترتبط نفوذية الغلاف الجوي بمعامل التخميد في الغلاف الجوي ومسافة الإرسال بالعلاقة التالية:

$$T_a = \exp\left(-\int_0^R \gamma(\rho) d\rho\right) \dots (2)$$

حيث $\gamma(\rho)$ معامل التخميد الناتج عن الامتصاص والتبعثر، R المسافة بين المرسل والمستقبل. وبالتالي يمكن حساب الضياعات بالديسيبل التي تتعرض لها الحزمة الضوئية أثناء الانتشار عبر الغلاف الجوي باستخدام المعادلة التالية:

$$Loss_{prop} = -10 \log_{10}(T_a) \dots (3)$$

يعطى معامل التخميد الناتج عن الامتصاص والتبعثر بالمعادلة التالية:

$$\gamma(\lambda) = \alpha_m(\lambda) + \alpha_a(\lambda) + \beta_m(\lambda) + \beta_a(\lambda) \dots (4)$$

حيث: α_m تعبر عن معامل الامتصاص الجزيئي

α_a تعبر عن معامل الامتصاص الذري

β_m تعبر عن معامل التبعثر الجزيئي

β_a تعبر عن معامل التبعثر الذري

تعتمد ظاهرة الامتصاص بالهواء بشكل أساسي على طول الموجة المستخدم. كما هو موضح بالجدول (1). لدينا بعض القيم التي تعبر عن معامل جزيئات الامتصاص تبعاً لطول الموجة المستخدم في حالة شروط جوية صافية:

الجدول (1) معامل الامتصاص α_m [7]

$\lambda(nm)$	$\alpha_m(dB/Km)$
550	0.13
850	0.41
1550	0.01

وبالنسبة لظاهرة التبعثر تعتمد بشكل أساسي على نصف قطر الحبيبات التي يصطدم بها الشعاع الليزري. إذا كانت $r < \lambda$ تصنف عملية التبعثر على أنها تبعثر Rayleigh، وفي حال كانت $r \approx \lambda$ تصنف عملية التبعثر على

أنها تبعثر Mie، وفي حال كانت $r > \lambda$ يمكن تفسير عملية التبعثر باستخدام نظرية الضوء الهندسي. ويبين الجدول (2) نوع عملية التبعثر بالاعتماد على نوع الجزيئات ونصف قطرها:

الجدول (2) نوع عملية التبعثر بالاعتماد على نوع الجزيئات ونصف قطرها [7]

نوع الجزيئات	نصف القطر (μm)	عملية التبعثر
جزيئات الهواء	0.0001	Rayleigh
حبيبات الضباب الخفيف	0.01-1	Rayleigh – Mie
قطرات الضباب	1-20	Mie – Geometrical
المطر	100-10000	Geometrical
الثلج	1000-5000	Geometrical
البرد	5000-50000	Geometrical

3-2- ضياعات بسبب الأحوال الجوية السائدة [6,7]

يخضع أداء وصلة FSO لعدة عوامل جوية مثل الضباب والثلج والمطر... إلخ، مما يؤدي إلى انخفاض في طاقة الإشارة المستقبلية. ومن بين هذه العوامل الجوية، عادة ما يهيمن الضباب على التخمين في الغلاف الجوي لأن حجم جسيمات الضباب يمكن مقارنتها بطول الموجة المستخدم بأظمة FSO. يمكن أن يغير خصائص الإشارة الضوئية أو يمكن أن يعيق مرور الضوء تماماً بسبب الامتصاص والانتثار والانعكاس.

الرؤية الجوية هي المقياس المفيد للتنبؤ بالظروف الجوية للغلاف الجوي. وتعرف الرؤية بأنها المسافة التي تمر بها الحزمة المضئية المتوازية في الجو حتى تتخفض شدتها بنسبة 2% من قيمتها الأصلية.

تعطى عبارة الضياعات $\beta(\lambda)$ بسبب الأحوال الجوية بالعلاقة التالية:

$$\beta(\lambda) = \frac{1}{R} 10 \log(e^{\gamma(\lambda)R}) \dots (5)$$

حيث: R المسافة بين المرسل والمستقبل. و $\gamma(\lambda)$ معامل الضياع الناتج عن التبعثر والامتصاص.

تأثير الضباب: الضياع بسبب الضباب يمكن تقديره بتطبيق نظرية تبعثر Mie. على الرغم من أن هذه العملية تتضمن حسابات معقدة وتتطلب معلومات مفصلة عن معاملات الضباب. لتخفيف هذا التعقيد تم وضع تطبيق بديل يعتمد على معلومات الرؤية ضمن مجال الإرسال، حيث الضياع بسبب الضباب يتم توقعه باستخدام نماذج تجريبية شائعة. إن طول الموجة 550nm عادة يؤخذ كطول موجة مرجعي لمجال الرؤية. تعطى العبارة التي تعطي الضياع بسبب

الضباب باستخدام نموذج تجريبي شائع لتبعثر Mie بالعلاقة التالية [12]:

$$\beta_{fog}(\lambda) = \frac{3.91}{V} \left(\frac{\lambda}{550} \right)^{-p} \dots (6)$$

حيث: $V(Km)$ مجال الرؤية، و p معامل توزع حجم التبعثر.

باعتدال نموذج Kim [12] تعطى قيمة هذا المعامل:

$$p = \begin{cases} 1.6 & V > 0.5 \\ 1.3 & 6 < V < 50 \\ 1.6V + 0.34 & 1 < V < 6 \dots (7) \\ V - 0.5 & 0.5 < V < 1 \\ 0 & V < 0.5 \end{cases}$$

وباعتدال نموذج Kruse [12] تعطى قيمة المعامل:

$$p = \begin{cases} 1.6 & V > 0.5 \\ 1.3 & 6 < V < 50 \dots (8) \\ 0.585V^{\frac{1}{3}} & V < 6 \end{cases}$$

تأثير الثلج: الضياعات بسبب الثلج تختلف بالاعتماد على حجم حبات الثلج ومعدل تساقط الثلج. نظراً لأن حجم حبات الثلج أكبر من حجم قطرات المطر، فإنها تؤدي إلى خفوت أكبر في الإشارة مقارنة بقطرات المطر. يمكن أن يصل حجم حبة الثلج إلى 20 mm والتي يمكن أن تمنع مسار الإشارة الضوئية تماماً اعتماداً على قطر الشعاع الليزري. يمكن تصنيف الضياعات بسبب الثلج كضياع بالثلج الرطب و الجاف.

وتعطى عبارة الضياع β_{Snow} بسبب الثلج بالعلاقة التالية:

$$\beta_{Snow} = aS^b \dots (9)$$

حيث S معدل تساقط الثلج ويقدر بوحدة mm/hr كما تعطى قيم كل من a و b كما يلي [7]:
حالة ثلج جاف:

$$a = 5.42 \times 10^{-5} + 5.4958776 \cdot b = 1.38 \dots (10)$$

حالة ثلج رطب:

$$a = 1.023 \times 10^{-4} + 3.7855466 \cdot b = 0.72 \dots (11)$$

الضياع بسبب الثلج يعتمد على مجال الرؤية ويمكن تقريب باستخدام نموذج تجريبي [7] بالعلاقة التالية:

$$\alpha_{Snow} = \frac{58}{V} \dots (12)$$

تأثير المطر: حجم حبات المطر المتساقطة تسبب تبعثر طول الموجة ويزداد الضياع الناتج عن المطر خطياً بزيادة معدل تساقط الأمطار. تعطى عبارة الضياع β_{rain} بسبب المطر بالعلاقة التالية [7]:

$$\beta_{rain} = 1.076Ra^{0.67} \dots (13)$$

حيث Ra معدل تساقط الأمطار ويقدر بوحدة mm/hr وتقريب هذه العلاقة بنموذج تجريبي نحصل على العلاقة التالية:

$$\alpha_{rain} = \frac{2.8}{V} \dots (14)$$

النتائج والمناقشة:

نقوم بإجراء المحاكاة من أجل تعديل خارجي باستخدام المعدل MZ (mach-zehnder) وكاشف ضوئي من النوع (Avalanche Photodiode APD). ونقوم بتغيير كل من طول القناة ومعامل تخميد القناة -حيث أن التخميد الكلي للقناة يساوي جداء طول القناة بمعامل التخميد- وذلك من أجل الأطوال الموجية المستخدمة في نوافذ الإرسال والتي تمت دراستها في القسم النظري وهي 1250 nm, 850 nm.

نجري المحاكاة على مرحلتين: في الأولى نقوم بتنصيب معامل التخميد وتغيير طول القناة اللاسلكية، وفي الثانية نقوم بتنصيب طول القناة اللاسلكية وتغيير معامل التخميد، وذلك بهدف تحديد التخميد الكلي الاعظمي للقناة الذي تعمل عنده الوصلة بأداء مقبول وفق معايير الأداء والتي هي: معدل الخطأ في البت (Bit Error Rate -BER) ومعامل الجودة (Quality Factor -QF). حيث يعتبر الأداء مقبول من أجل قيم لمعدل الخطأ في البت من مرتبة 10^{-9} وأقل ومن أجل معامل جودة من رتبة 6 وأكثر

الجدول (3) قيم معاملات المحاكاة

المعامل	القيم
طول الموجة	850 nm, 1250 nm
طول قناة الاتصال	2, [9 – 12] Km
معامل تخميد القناة	5, [30 – 37] dB/Km
استطاعة المرسل	[30] dBm

1- دراسة الطول الموجي 850 nm

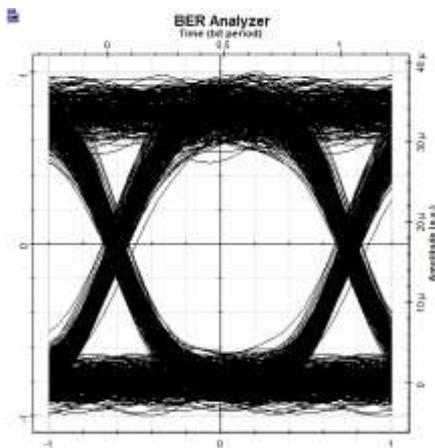
المرحلة الأولى: يتم تثبيت معامل التخميد على القيمة 5 dB/Km وتغيير طول القناة ضمن المجال [10 – 12] Km ونقوم بتقييم كل من معدل الخطأ في البت و معامل الجودة فنحصل على الجدول (4).

الجدول (4) معامل الجودة ومعدل الخطأ في البت للمرحلة الأولى (850 nm)

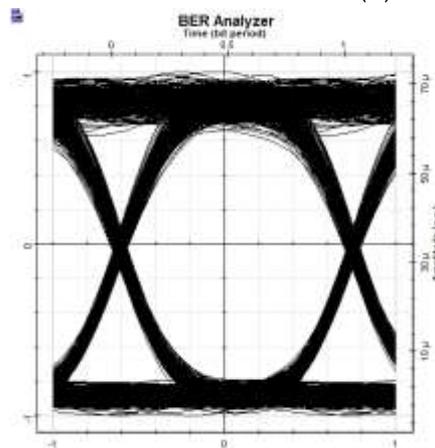
Length (Km)	Atten. (dB)	QF	BER
10	50	33.48	10^{-246}
10.2	51	26.57	10^{-156}
10.4	52	22.03	10^{-108}
10.6	53	17.20	10^{-66}
10.8	54	13.77	10^{-43}
11	55	11.25	10^{-29}
11.2	56	8.65	10^{-18}
11.4	57	6.73	10^{-12}
11.5	57.5	6.42	10^{-10}
11.6	58	5.60	10^{-8}
11.8	59	4.30	10^{-6}
12	60	3.35	0.0004

نلاحظ من خلال الجدول (4) أن الأداء يتراجع مع زيادة مسافة الاتصال وذلك بسبب تزايد التخميد الكلي للقناة، ونلاحظ أيضاً أنه من أجل مسافة اتصال 11.5 km يكون معامل الجودة 6.42 ومعدل الخطأ في البت من رتبة 10^{-10} وهو أداء مقبول، أما من أجل مسافة اتصال أكبر يتراجع الأداء.

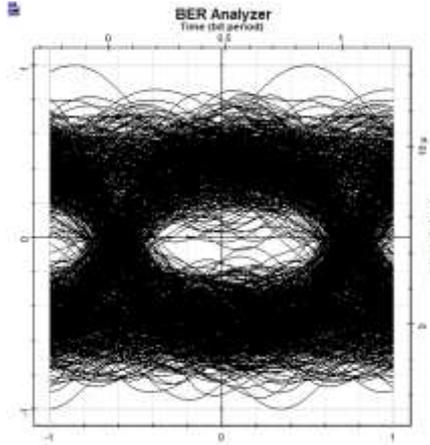
يبين الشكل (6) مخطط العين من أجل مسافات اتصال مختلفة.



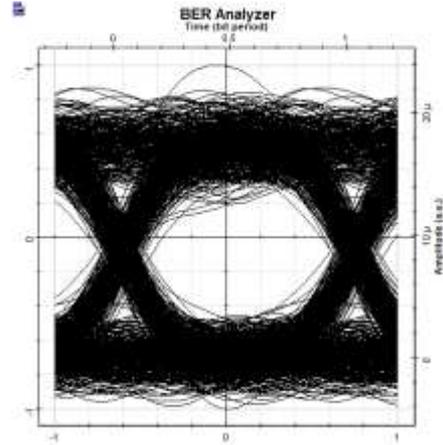
الشكل (6-b) 11 Km



الشكل (6-a) 10.5 Km



الشكل (6-d) 12 Km



الشكل (6-c) 11.5 Km

الشكل (6): مخطط العين من أجل معامل تخميد 5 dB/Km وطول قناة متغير وطول موجة 850 nm

نلاحظ من خلال المخططات في الشكل (6) تراجع للأداء مع زيادة التخميد الكلي بسبب زيادة طول القناة، وأن فتحة العين تصبح أصغر مع اقتراب مستوى البت "1" من مستوى البت "0" وصعوبة التمييز بينهما. ونستنتج أنه من أجل معامل تخميد 5 dB/Km فإن الطول الموجي 850 nm محدود بمسافة اتصال 11.5 Km . أي محدود بتخميد كلي من رتبة 57.2 dB

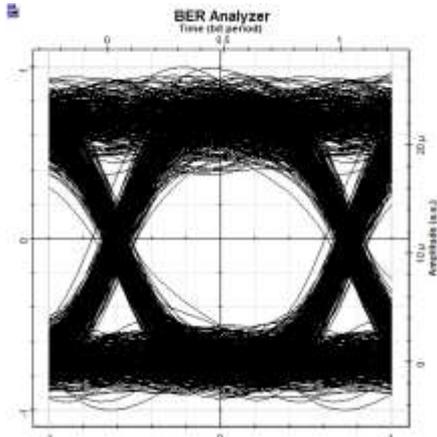
المرحلة الثانية: يتم تثبيت طول القناة على القيمة 2 Km وتغيير معامل التخميد ضمن المجال $[34 - 37] \text{ dB/Km}$ ونقوم بتقييم كل من معدل الخطأ في البت و معامل الجودة فنحصل على الجدول (5).

الجدول (5): معامل الجودة ومعدل الخطأ في البت للمرحلة الثانية (850 nm)

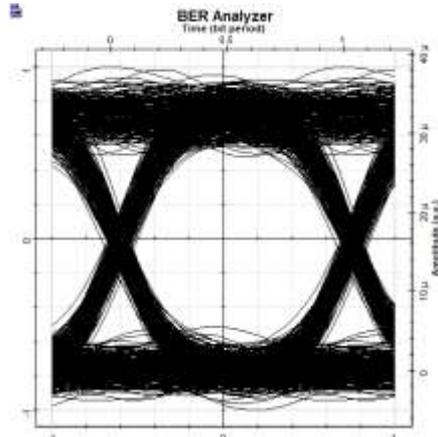
$\alpha \text{ (dB/Km)}$	Atten. (dB)	QF	BER
34	68	16.10	10^{-58}
34.2	68.4	15.15	10^{-52}
34.4	68.8	13.40	10^{-41}
34.6	69.2	13.03	10^{-39}
34.8	69.6	11.55	10^{-31}
35	70	10.82	10^{-27}
35.2	70.4	9.63	10^{-22}
35.4	70.8	9.16	10^{-20}
35.6	71.2	8.38	10^{-17}
35.8	71.6	7.93	10^{-15}
36	72	7.09	10^{-13}
36.2	72.4	6.39	10^{-11}
36.4	72.8	6.22	10^{-10}
36.6	73.2	5.49	10^{-8}
36.8	73.6	5.18	10^{-7}
37	74	4.49	10^{-6}

نلاحظ من خلال الجدول (5) أن الأداء يتراجع مع زيادة معامل تخميد القناة وذلك بسبب تزايد التخميد الكلي للقناة، ونلاحظ أيضا أنه من أجل معامل تخميد 36.4 dB/km يكون معامل الجودة 6.22 ومعدل الخطأ في البت من رتبة 10^{-10} وهو أداء مقبول، أما من أجل قيم أكبر لمعامل تخميد القناة يتراجع الأداء.

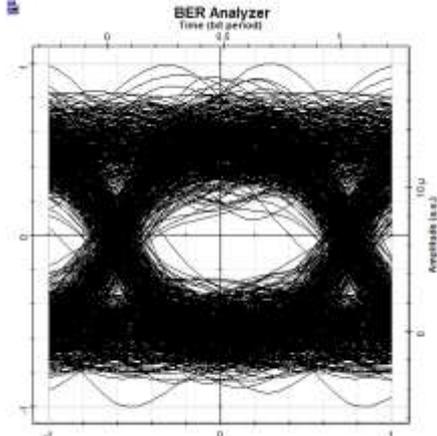
يبين الشكل (7) مخطط العين من أجل قيم لمعامل تخميد مختلفة. نلاحظ من خلال المخططات في الشكل (7) تراجع للأداء مع زيادة التخميد الكلي بسبب زيادة معامل تخميد القناة، وأن فتحة العين تصبح أصغر مع اقتراب مستوى البت "1" من مستوى البت "0" وصعوبة التمييز بينهما. ونستنتج أنه من أجل طول قناة 2 Km فإن الطول الموجي 850 nm محدود بمعامل تخميد قناة 36.4 dB/Km ، أي محدود بتخميد كلي من رتبة 72.8 dB



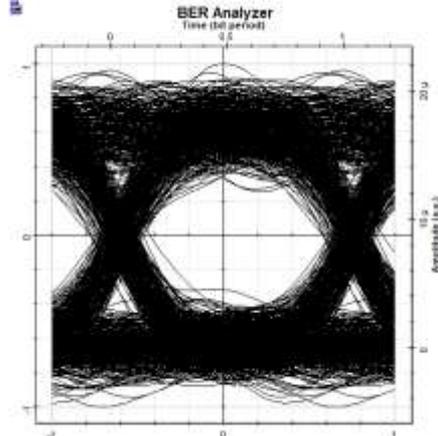
الشكل (7-b) 35.8 dB/Km



الشكل (7-a) 35 dB/Km



الشكل (7-d) 37 dB/Km



الشكل (7-c) 36.4 dB/Km

الشكل (7): مخطط العين من أجل معامل تخميد متغير وطول قناة 2 Km وطول موجة 850 nm

نلاحظ وجود فرق بين التخميد الكلي في المرحلة الأولى (طول قناة كبير متغير ومعامل تخميد قناة ثابت) والتخميد الكلي في المرحلة الثانية (طول قناة صغير ثابت ومعامل تخميد متغير) والذي يكون عنده الأداء عند الحدود الدنيا المقبولة، وذلك بسبب فقد المسار الحر للإشارة عند انتقالها عبر القناة وهو يزداد بزيادة طول القناة.

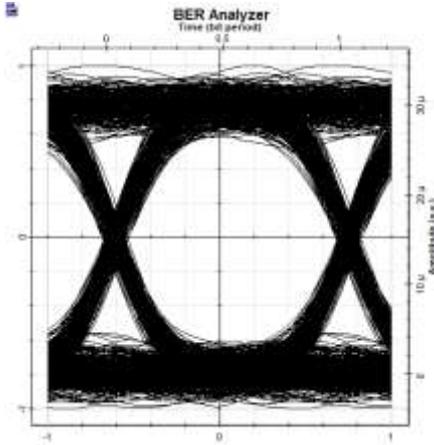
2- دراسة الطول الموجي 1250 nm

المرحلة الأولى: يتم تثبيت معامل التخميد على القيمة 5 dB/Km وتغيير طول القناة ضمن المجال $[9 - 11] \text{ Km}$ ونقوم بتقييم كل من معدل الخطأ في البت و معامل الجودة فنحصل على الجدول (6).

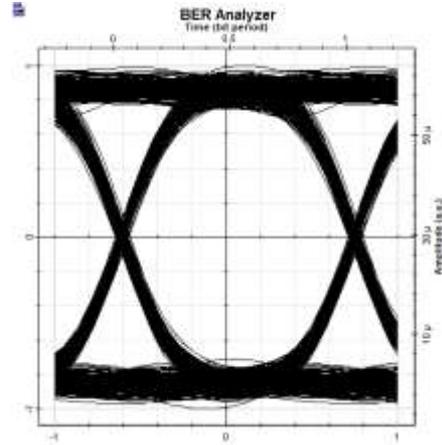
الجدول (6): معامل الجودة ومعدل الخطأ في البت للمرحلة الأولى (1250 nm)

Length (Km)	Atten. (dB)	QF	BER
9	45	28.66	10^{-181}
9.2	46	21.65	10^{-104}
9.4	47	17.25	10^{-67}
9.6	48	13.06	10^{-39}
9.8	49	9.90	10^{-23}
10	50	7.70	10^{-15}
10.2	51	6.32	10^{-10}
10.4	52	4.60	10^{-6}
10.6	53	3.40	0.0003
10.8	54	—	—
11	55	—	—

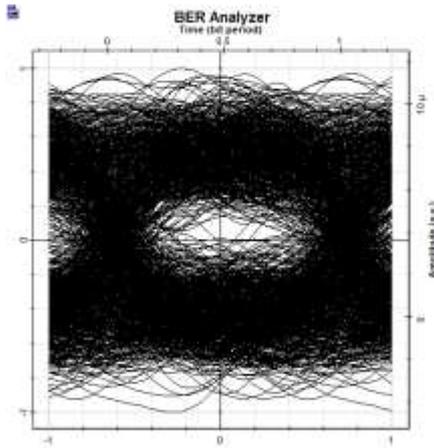
نلاحظ من خلال الجدول (6) أن الأداء يتراجع مع زيادة مسافة الاتصال وذلك بسبب تزايد التخميد الكلي للقناة، ونلاحظ أيضاً أنه من أجل مسافة اتصال 10.2 km يكون معامل الجودة 6.32 ومعدل الخطأ في البت من رتبة 10^{-10} وهو أداء مقبول، أما من أجل مسافة اتصال أكبر يتراجع الأداء. يبين الشكل (8) مخطط العين من أجل مسافات اتصال مختلفة.



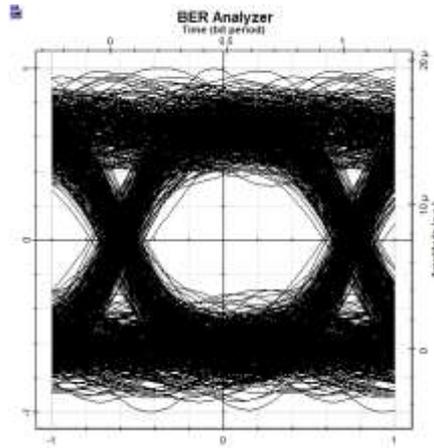
الشكل (8-b) 9.7 Km



الشكل (8-a) 9.2 Km



الشكل (8-d) 10.7 Km



الشكل (8-c) 10.2 Km

الشكل (8): مخطط العين من أجل معامل تخميد 5 dB/Km وطول قناة متغير وطول موجة 1250 nm

لاحظ من خلال المخططات في الشكل (8) تراجع للأداء مع زيادة التخميد الكلي بسبب زيادة طول القناة، وأن فتحة العين تصبح أصغر مع اقتراب مستوى البت "1" من مستوى البت "0" وصعوبة التمييز بينهما. ونستنتج أنه من أجل معامل تخميد 5 dB/Km فإن الطول الموجي 1250 nm محدود بمسافة اتصال 10.2 Km . أي محدود بتخميد كلي من رتبة 51 dB

المرحلة الثانية: يتم تثبيت طول القناة على القيمة 2 Km وتغيير معامل التخميد ضمن المجال $[30 - 33] \text{ dB/Km}$ ونقوم بتقييم كل من معدل الخطأ في البت ومعامل الجودة فنحصل على الجدول (8).

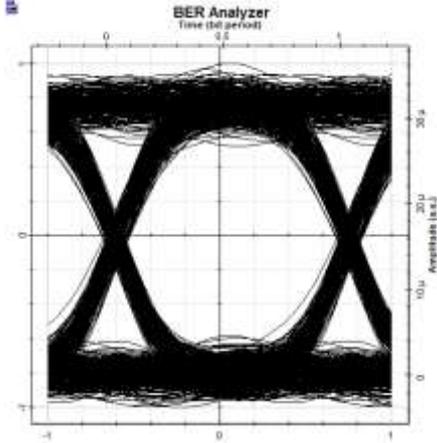
الجدول (8): معامل الجودة ومعدل الخطأ في البت للمرحلة الثانية (1250 nm)

$\alpha \text{ (dB/Km)}$	Atten. (dB)	QF	BER
30	60	19.18	10^{-82}
30.2	60.4	17.16	10^{-66}
30.4	60.8	15.44	10^{-54}
30.6	61.2	14.11	10^{-45}
30.8	61.6	12.99	10^{-39}
31	62	11.93	10^{-33}
31.2	62.4	11.08	10^{-29}
31.4	62.8	10.22	10^{-25}
31.6	63.2	9.30	10^{-21}
31.8	63.6	8.42	10^{-17}
32	64	8.00	10^{-16}
32.2	64.4	7.18	10^{-13}
32.4	64.8	6.30	10^{-11}
32.6	65.2	5.82	10^{-9}
32.8	65.6	5.20	10^{-8}
33	66	4.80	10^{-7}

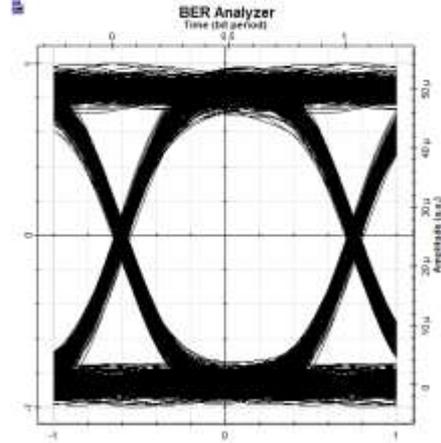
نلاحظ من خلال الجدول (7) أن الأداء يتراجع مع زيادة معامل تخميد القناة وذلك بسبب تزايد التخميد الكلي للقناة، ونلاحظ أيضاً أنه من أجل معامل تخميد 32.4 dB/km يكون معامل الجودة 6.30 ومعدل الخطأ في البت من رتبة 10^{-11} وهو أداء مقبول، أما من أجل قيم أكبر لمعامل تخميد القناة يتراجع الأداء.

يبين الشكل (9) مخطط العين من أجل قيم لمعامل تخميد مختلفة.

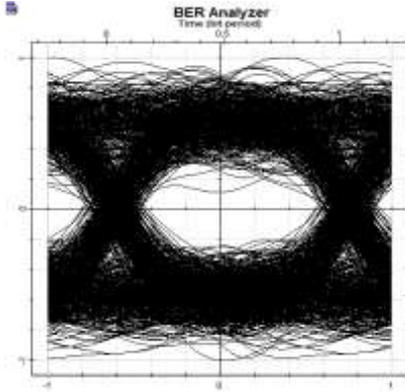
نلاحظ من خلال المخططات في الشكل (9) تراجع للأداء مع زيادة التخميد الكلي بسبب زيادة معامل تخميد القناة، وأن فتحة العين تصبح أصغر مع اقتراب مستوى البت "1" من مستوى البت "0" وصعوبة التمييز بينهما. ونستنتج أنه من أجل طول قناة 2 Km فإن الطول الموجي 1250 nm محدود بمعامل تخميد قناة 32.4 dB/Km ، أي محدود بتخميد كلي من رتبة 64.8 dB .



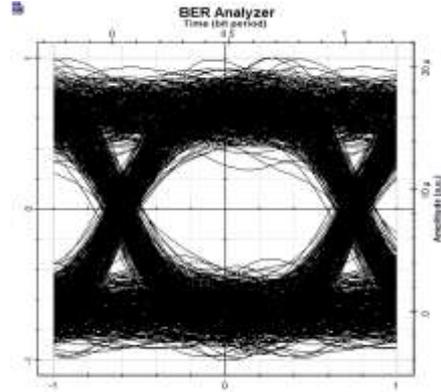
الشكل (9-b) 31 dB/Km



الشكل (9-a) 30 dB/Km



الشكل (9-d) 33 dB/Km



الشكل (9-c) 32.4 dB/Km

الشكل (9): مخطط العين من أجل معامل تخميد متغير وطول قناة 5 dB/Km وطول موجة 1250 nm

وهنا أيضا نلاحظ وجود فرق بين التخميد الكلي في المرحلة الأولى والتخميد الكلي في المرحلة الثانية، وذلك بسبب فقد المسار الحر للإشارة عند انتقالها عبر القناة وهو يزداد بزيادة طول القناة.

3- مقارنة مع نتائج دراسات سابقة

من الجدير بالذكر أن النتائج التي حصلنا عليها لا تتعارض بل تتسجم مع النتائج التي تقدمها الدراسات العالمية السابقة وفي بعض الحالات تقدم نتائج أفضل، حيث نعرض منها ما يلي:

تبين الدراسة [15] تأثير العوامل البيئية مثل المطر والضباب والتلج والغبار على أداء الاتصالات اللاسلكية الضوئية باستخدام برنامج Opti-system. مع الأخذ بعين الاعتبار تأثير الرؤية والأطوال الموجية على التخميد

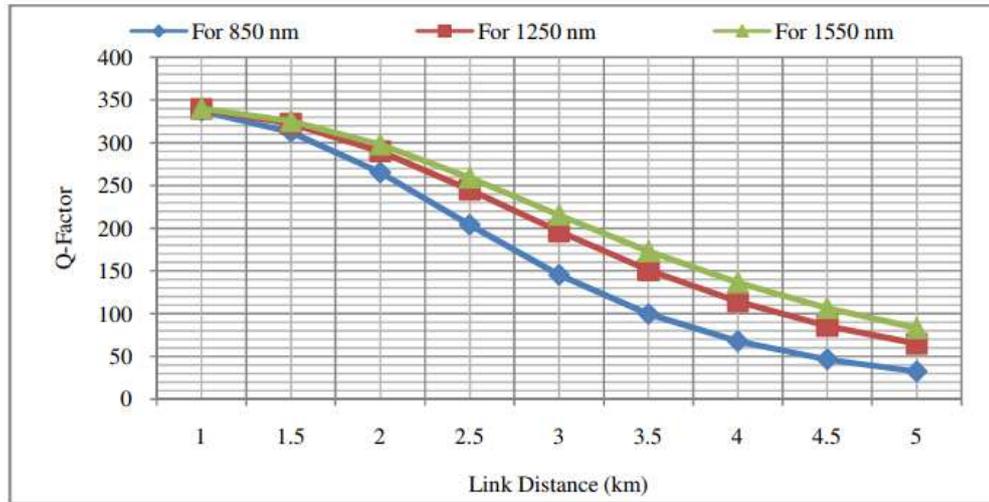
الجوي في ظروف الطقس المختلفة للوصلة البصرية للفضاء الحر. وتقدم تقدير للمسافة القصوى بين المرسل والمستقبل التي تعمل عندها الوصلة بأداء مقبول.

نجد التطابق بين النتائج التي حصلنا عليها والنتائج التي تقدمها هذه الدراسة من حيث ارتباط معدل الخطأ في البت BER مع معامل الجودة QF حيث كانت قيمة معامل الجودة (من أجل طول موجي 850 nm) من رتبة 13 من أجل $ber = 10^{-39}$ ومن رتبة 9 من أجل $ber = 10^{-20}$ ومن رتبة 6 من أجل $ber = 10^{-10}$ وهذا يتفق مع نتائجنا المعروضة في الجداول (4) و (5).

أما من حيث الأداء بالنسبة للتخميد الكلي على الوصلة فحصلنا من أجل طول موجة 850 nm وتخمين 53 dB على معامل جودة $QF = 17.2$ ومعدل خطأ في البت $ber = 10^{-66}$ وهو أداء أفضل من الأداء الذي تقدمه الدراسة حيث كان معامل الجودة $QF = 11.77$ ومعدل خطأ في البت $ber = 10^{-32}$ وذلك من أجل نفس طول الموجة ونفس التخمين الكلي على الوصلة.

تقدم الدراسة [16] دراسة حول تأثير الرؤية بالإضافة إلى الأطوال الموجية على التوهين الجوي في الظروف الجوية المختلفة للوصلة البصرية للفضاء الخالي من نقطة إلى نقطة. وتناقش أيضاً المنهجية لمعرفة مسافة الاتصال المثلى لوصلة FSO من نقطة إلى نقطة والتي سيتم تشغيلها في ظروف مناخية مختلفة. حيث وجد أن التوهين الجوي يتغير مع تغير حالة الطقس وكذلك أطوال الموجات المستخدمة.

تبين نتائج هذه الدراسة أن أداء الطول الموجي 850 nm أفضل من أداء الطول الموجي 1250 nm من أجل نفس الشروط من حيث التخمين وطول وصلة الاتصال كما هو مبين في الشكل (10)



الشكل (10): مقارنة معامل الجودة من أجل الأطوال الموجية المختلفة

وهي تتفق مع النتائج التي حصلنا عليها حيث وجدنا أنه من أجل معامل تخمين 5 dB/Km فإن الطول الموجي 850 nm محدود بمسافة اتصال 11.5 Km . أي محدود بتخميد كلي من رتبة 57.2 dB ، أما من أجل الطول الموجي 1250 nm محدود بمسافة اتصال 10.2 Km . أي محدود بتخميد كلي من رتبة 51 dB .

الاستنتاجات والتوصيات:

نقوم بإجراء مقارنة لطولي الموجة (850, 1250) nm من أجل الحد الأدنى من الأداء المقبول، ونرتب ذلك في الجدول (8).

الجدول (8): مقارنة أطوال الموجة

wavelength (nm)	max α for 2Km	Atten. (dB)	Channel length for 5dB/Km	Atten. (dB)
850	36.4 dB/Km	72.8	11.5 Km	57.5
1250	32.4dB/Km	64.8	10.2 Km	51

وتخلص إلى الآتي:

1. نلاحظ من الجدول (8) أن معامل التخميد الاعظمي الذي يمكن أن تعمل عنده وصلة الاتصال ضمن حدود الأداء المقبول ينقص بإزدياد طول الموجة مما يحد من أداء الوصلة وكذلك الأمر بالنسبة لطول القناة الأعظمي الذي تعمل ضمنه الوصلة بشكل صحيح ينقص بزيادة طول الموجة.
2. من أجل الطول الموجي الواحد التخميد الكلي الأعظمي في حال كان معامل التخميد ثابت وطول القناة متغير أقل من التخميد الكلي الأعظمي في حال كان معامل التخميد متغير وطول القناة ثابت وذلك بسبب زيادة التخميد بسبب فقد المسار الحر الذي يتناسب طردياً مع المسافة.
3. يوجد فرق في معامل التخميد من رتبة 8 dB/Km من أجل طول قناة ثابتة بين طولي الموجة – [850 – 1250]nm
4. يوجد فرق في طول القناة من رتبة 1.3 Km من أجل معامل تخميد ثابت بين طولي الموجة – [850 – 1250]nm
5. يستنتج الباحث باستخدام الطول الموجي [850]nm هو الأفضل نظراً لممانعة لمنغصات تقلبات الطقس بالإضافة إلى وجود تجهيزات من حيث المرسلات والمستقبلات تدعم هذا الطول الموجي.

References:

- [01] Alimi, I., Shahpari, A., Sousa, A., Ferreira, R., Monteiro, P., & Teixeira, A. (2017). Challenges and opportunities of optical wireless communication technologies. Optical communication technology, 10.
- [02] Arun K. Majumdar, Jennifer C. Ricklin, “Free-Space Laser Communications Principles and Advances”, (2008) Springer Science + Business Media LLC, ISBN-13: 978-0-387-28652-5, pp.1-25
- [03] Alkholidi, Abdulsalam Ghalib, and Khaleel Saeed Altowij. "Free space optical communications—Theory and practices." Contemporary Issues in Wireless Communications (2014): 159-212.
- [04] John M. Senior, “Optical Fiber Communications Principles and Practice, Third Edition”, (2009) Pearson Education Limited British Library, ISBN: 978-0-13-032681-2, pp. 2-10
- [05] M. N. O. Sadiku , S.M. Musa , “Free Space Optical Communications: An Overview”, (2016) European Scientific Journal, ISSN: 1857 – 7881
- [06] Hemani Kaushal , V.K. Jain , Subrat Kar, “Free Space Optical Communication”, (2017) Springer Pvt. Ltd, ISBN :978-81-322-3689-4 , pp.44- 86.
- [07] Hemani Kaushal, Georges Kaddoum, “Optical Communication in Space: Challenges and Mitigation Techniques”, IEEE Communications Surveys & tutorials, (2017).

- [08] Arun K. Majumdar, “Advanced Free Space Optics (FSO) A Systems Approach”, (2015) Springer Science+Business Media New York, ISBN: 978-1-4939-0917-9, pp.1-23.
- [09] Anshul Vats, Vk Jain, Hemani Kaushal, “Free space optical communication: laser sources, modulation schemes and detection techniques”, ResearchGate,(2013).
- [10] Zhe Wang, Jingyuan Wang, Zhiyong Xu, “Error Performance Analysis in Short and Long Wavelength Infrared Free Space Optical Communication”, IEEE International Conference on Space Optical Systems and Application (ICSOS), New Orleans, LA, USA, (2015)
- [11] A. Anis , A. K. Rahman , C. B. M. Rashidi, S. A. Aljunid, “Link Budget Analysis for Free Space Optical (FSO) Communication under Haze Condition with Adverse Wavelength”, IEEE 3rd International Conference on Electronic Design (ICED), Phuket, Thailand, (2016)
- [12] Ao, Jun, Yun Zhi Xia, Long Che, Tao Zhang, and Chun Bo Ma. "Study on Fog Attenuation Characteristics and Experiment Measurement for Laser Propagation in Atmosphere." In *Advanced Materials Research*, vol. 760, pp. 199-203. Trans Tech Publications Ltd, 2013.
- [13] Kim, Isaac I., Bruce McArthur, and Eric J. Korevaar. "Comparison of laser beam propagation at 785 nm and 1550 nm in fog and haze for optical wireless communications." In *Optical wireless communications III*, vol. 4214, pp. 26-37. International Society for Optics and Photonics, 2001
- [14] Kwiecień, Janusz. "The effects of atmospheric turbulence on laser beam propagation in a closed space—An analytic and experimental approach." *Optics Communications* 433 (2019): 200-208.
- [15] Ali, Hosam Abd Elrazek Mohamed, El-Sayed Soliman A. Said, and Mohamed Ebrahim Yousef. "Effect of environmental parameters on the performance of optical wireless communications." *International Journal of Optics* 2019 (2019).
- [16] Islam, Md Nur, and MN Al Safa Bhuiyan. "Effect of operating wavelengths and different weather conditions on performance of point-to-point free space optical link." *International Journal of Computer Networks & Communications* 8, no. 2 (2016): 63-75.