



الجمهورية العربية السورية  
جامعة دمشق  
المعهد العالي لبحوث الليزر و تطبيقاته

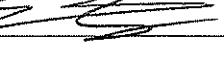
نقل البيانات بمعدل 40Gb/s  
باستخدام تقنية DWDM في سوريا  
**Data Transmission at 40Gb/s  
Using DWDM Technology in Syria**

رسالة معدة لنيل شهادة الماجستير باختصاص علوم الليزر و تطبيقاته

الطالبة : م. عبرir مسلح

إشراف الدكتور : أ. د. م. عماد أسعد

نوقشت هذه الرسالة وأجيزت يوم الأربعاء الواقع في ٢٠١٤/٨/٢٠ من قبل السادة  
أعضاء لجنة الحكم التالية أسماؤهم :

التوقيع	الصفة	الاسم
	عضوًا مشرفاً	أ.د.م عماد أسعد
	عضوًا	أ.د. فواز الموصلي
	عضوًا	د. جمان أبو جيب

تم إجراء التعديلات المطلوبة وأصبحت الرسالة صالحة لمنح درجة الماجستير في  
علوم الليزر وتطبيقاته.

بِسْمِ اللَّهِ الرَّحْمَنِ الرَّحِيمِ

لا يسعني هنا إلا التقدم بجزيل الشكر والعرفان إلى كل من مدّ لي يد العون  
وساهم في إنجاز هذا البحث . . .

وأخص بالشكر والامتنان والتقدير  
الدكتور المشرف عmad أسعد

لما قدمه لي من رعاية واهتمام كبيرين وكان توجيهاته وإرشاداته القيمة الأثر  
الكبير في إنجاز وإثراء هذه الرسالة .

كما لا يسعني إلا أن أتوجه بالشكر والتقدير إلى السادة أعضاء لجنة الحكم على  
الرسالة لما بذلوه من وقت وجهد في قراءة البحث وتقويه .

وأتوجه بالشكر إلى كادر المعهد العالي لبحوث الليزر وتطبيقاته الذين مدوا لي يد  
العون والمساعدة .

وأتقدم بالشكر إلى كل من ساعدني من الزملاء في المؤسسة العامة  
للاتصالات ولم يخلوا بتقديم كل ما هو مفيد .

# اللهم اسألك رحمة

بعد بذل الجهد المضني في سبيل إنجاز هذا البحث أهدي ثمرة عملي إلى :

من أستمد منه شعوري بالفخر والاعتزاز . . . .

إلى والدي الرائع

صاحبة الروح الجميلة والقلب الطيب المعطاء . . . .

إلى والدتي الحنونة

من يشاركوني لحظات فرحي وحزني . . . .

إلى إخوتي الأعزاء

من كان لي خير سند وخير مشجع . . . .

إلى زوجي الحبيب

إلى بسمة عمري وأمل حياتي . . . .

إلى طفلي الغالي محمد

# الفهرس

٣	مقدمة
٥	الفصل الأول : أنظمة الاتصالات الضوئية
٥	١ - تطور أنظمة الاتصالات الضوئية
٦	١ - ٢ - الشبكات الضوئية
٩	١ - ٣ - نظام الاتصالات الضوئي
٩	١ - ٣ - ١ - مكونات نظام الاتصالات الضوئي
١١	١ - ٣ - ٢ - معدل خطأ البتات في نظام الاتصالات الضوئي
١٢	١ - ٣ - ٣ - الألياف الضوئية
١٢	١ - ٣ - ٣ - ١ - ميزات الليف الضوئي
١٣	١ - ٣ - ٣ - ٢ - بنية الليف الضوئي
١٤	١ - ٣ - ٣ - ٣ - أنماط الألياف الضوئية
١٧	الفصل الثاني : أنظمة التجميع بتقسيم طول الموجة ( WDM )
١٧	٢ - ١ - مقدمة
١٧	٢ - ٢ - أنواع التجميع
١٩	٢ - ٣ - ميزات WDM
٢١	٢ - ٤ - معاملات أنظمة WDM
٢٢	٢ - ٥ - تصنیف أنظمة WDM
٢٥	٢ - ٦ - أنواع المضخمات في أنظمة WDM
٢٥	٢ - ٧ - أشكال التعديل في أنظمة WDM
٢٨	الفصل الثالث : معوقات نقل الإشارة في أنظمة الاتصالات الضوئية
٢٨	٣ - ١ - مقدمة
٢٨	٣ - ٢ - الآثار الخطية

٢٨	٣ - ٢ - ١ - التخايد
٣١	٣ - ٢ - ٢ - ضجيج الإصدار التلقائي المضخم ASE
٣١	٣ - ٢ - ٣ - التشتت
٣٢	٣ - ٣ - ٢ - ١ - أنواع التشتت
٣٩	٣ - ٣ - ٢ - ٣ - زيادة معدل الإرسال
٤٣	٣ - ٣ - الآثار اللاخطية
٤٦	٣ - ٤ - تعويض التشتت
٥١	<b>الفصل الرابع : الدراسة المرجعية</b>
٥١	٤ - ١ - محاكاة تعويض التشتت في أنظمة WDM
٥٦	٤ - ٢ - دراسة و محاكاة آثار الاستقطاب في أنظمة WDM
٦٣	٤ - ٣ - دراسة و محاكاة أداء نظام DWDM بتغيير البعد بين القنوات
٦٧	٤ - ٤ - دراسة تخفيف أثر PMD على طول الليف
٧١	<b>الفصل الخامس : الدراسة العملية</b>
٧١	٥ - ١ - مواصفات منظمة ITU-T لأنواع الألياف الضوئية
٧٨	٥ - ٢ - وسائل قياس PMD
٨١	٥ - ٣ - طريقة إجراء قياس PMD باستخدام المقياس EXFO FTP-5500
٨٣	٥ - ٤ - نتائج قياس PMD و تحليلها
٨٨	<b>الخلاصة</b>
٨٩	<b>جدول الاختصارات</b>
٩٠	<b>المراجع العلمية</b>

## مقدمة:

إن الحاجة المتزايدة لنقل البيانات بساعات كبيرة جداً في بلدنا دعانا إلى إجراء دراسة ميدانية لتوزع شبكة الاتصالات السورية و إمكانية تلبية الحاجة المطلوبة . يكمن الهدف من هذا البحث في الحصول على شبكة اتصالات نستطيع من خلالها نقل بيانات بسرعة 40Gb/s بواسطة تقنية التجميع بتقسيم طول الموجة DWDM مما يزيد من سعة هذه الشبكة حيث أن السعة العظمى المتوفرة حالياً لنقل البيانات لا تزيد عن 10Gb/s لكن هذا يتطلب التغلب على مشكلة تشتت النمط الاستقطابي PMD والذي يؤثر على سرعة نقل البيانات و ما سنقوم به بالتحديد هو قياس قيم معامل PMD على طول الليف فإذا كانت قيمه ضمن الحدود المقبولة سيتم إضافة تجهيزات جديدة تتيح لنا رفع معدل السرعة و إلا سنضطر إما لإضافة معوضات للتشتت DCM و معيدات توليد Regenerators في بعض المقاطع أو استبدال الليف بكامله في مقاطع أخرى .

تقسم الأطروحة إلى خمسة فصول موزعة على الشكل التالي :

في الفصل الأول سنتحدث عن تطور أنظمة الاتصالات الضوئية و مكونات نظام الاتصالات الضوئي كما سنشرح قليلاً عن الشبكات الضوئية كتصنيفها و تخطيطها و حمايتها و إدارتها ثم سنتناول موضوع الألياف الضوئية من حيث الميزات و البنية و الأنواع .

أما في الفصل الثاني سنشرح بالتفصيل عن تقنية التجميع بتقسيم طول الموجة WDM والتي تتمتع بالعديد من الميزات و سنبين أنواع التجميع وطرق تصنيف أنظمة WDM و أنواع المضخمات و أشكال التعديل .

في الفصل الثالث سنتكلم عن معوقات نقل الإشارة في أنظمة الاتصالات الضوئية والتي تنقسم إلى آثار خطية و أخرى غير خطية ومن أبرز الآثار الخطية التي سيتم شرحها التشتت و سنبين طرق تعويضه .

في الفصل الرابع سنتناول الدراسة المرجعية للبحث كمحاكاة تعويض التشتت و دراسة و محاكاة آثار الاستقطاب و دراسة و محاكاة أداء نظام DWDM بتغيير البعد بين القنوات و دراسة تخفيف أثر PMD على طول الليف .

و الفصل الخامس سيكون مكرساً لعرض الدراسة العملية والتي نبين فيها أنواع الألياف الضوئية المستخدمة و وسائل قياس PMD و إجرائية القياس باستخدام المقياس EXFO FTP-5500 و نتائج القياس و تحليلها .

وأخيراً سنبين في الخاتمة النتيجة التي توصلنا إليها من هذه الدراسة و من ثم سنورد جدول الاختصارات و المراجع العلمية التي استندنا إليها في البحث .

# الفصل الأول : أنظمة الاتصالات الضوئية

## ١-١- تطور أنظمة الاتصالات الضوئية :

بدأ استخدام أنظمة الاتصالات الضوئية لنقل كميات كبيرة من البيانات في شبكات المناطق العريضة wide-area و الواسعة metropolitan - area و المحلية local - area وأصبحت أنظمة الاتصالات الضوئية هي الأنظمة المستخدمة في الشبكات البرية و البحرية بعد أن كانت تعتمد على الكابلات المحورية و الأنظمة الراديوية في سبعينيات و ثمانينات القرن الماضي [ ١ ] .

ففي عام ١٩٨٨ تم وضع أول كابل ممتد عبر الأطلسي وهو TAT8 ي العمل عند طول الموجة 1300nm و بمعدل نقل 280Mbit/s لكل ليف ثم تلاه تشغيل TAT9 ي العمل عند طول الموجة 1550nm و بمعدل نقل 560Mbit/s لكل ليف [ ٦ ] ، وهذا النظام مشابه لأنظمة الكابلات المحورية من حيث السعة لكن المسافة الفاصلة بين المكررات أكبر و بالتالي قل عدد هذه المكررات و بذلك يكون قد تم التغلب على مشكلة أساسية كانت تعاني منها الأنظمة البحرية و هي كثرة عدد المكررات و بالتالي كثرة الأعطال و الصيانة ثم أصبحت الحاجة ملحة للحصول على أنظمة اتصالات ضوئية بسعة أعلى و لمسافات أطول فكان استخدام أنظمة Synchronous Optical Networks ( SONET - الشبكات الضوئية المتزامنة ) العامل الفاصل لتطور الأنظمة الضوئية و من بعدها نظام SDH ( Synchronous Digital Hierarchy - الهرمية الرقمية المتزامنة ) و هو أول نظام ضوئي عالي السعة بمعدل 2.5Gbit/s و ي العمل عند طول الموجة 1550nm و المسافة الفاصلة بين كل مكررين متتاليين 90Km و منذ ذلك الحين أصبحت أنظمة الاتصالات الضوئية ذات سعة أكبر و جودة أعلى من الأنظمة الراديوية [ ٦ ] .

و قد تم إدخال الكثير من التحسينات مثل استخدام ألياف وحيدة النمط عوضاً عن متعددة النمط مما وفر سعة نقل أكبر كما أن تغيير نافذة الطول الموجي المستخدم من 800nm إلى 1300nm و 1550nm أدى إلى تخفيض التخاذم.

مؤخراً أصبح من الممكن استخدام مسارات طويلة long - haul links على ألياف وحيدة النمط SMF بدون أن يحد ذلك من عرض المجال لليف و لتغطية الحاجة المتزايدة للشبكات ذات السعة العالية تم البحث عن أنظمة تعمل بمعدل 10-40Gb/s لكن ذلك أثر على عرض مجال الليف حيث ظهرت مشكلة التشتت و هي ما سنتحدث عنه بالتفصيل لاحقاً .

## ٢-١- الشبكات الضوئية :

### ١-٢-١- تصنيف الشبكات :

يمكن تصنيف الشبكات إلى ثلاثة أجيال :

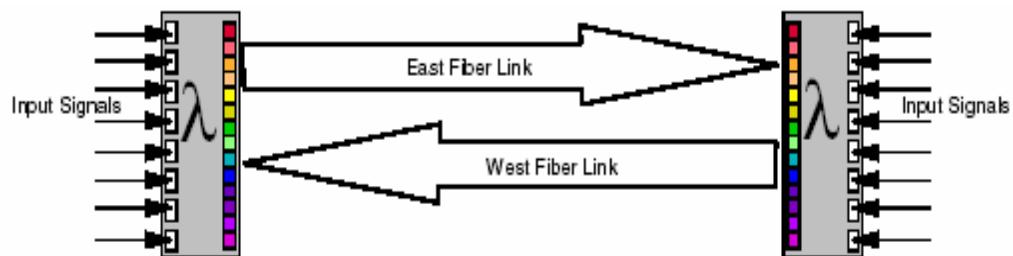
- شبكات الجيل الأول : تم استخدام الوصلات النحاسية أو تقنية الأمواج الميكروية.
- شبكات الجيل الثاني : تم إدخال الألياف الضوئية بالإضافة للوصلات النحاسية و تقنية الأمواج الميكروية و تكون المقاسم الكترونية و وسط النقل ضوئي.
- شبكات الجيل الثالث : تم استخدام تقنية التجميع بتقسيم طول الموجة (WDM Wavelength Division Multiplexing) . في هذه الشبكات تكون المقاسم و كذلك وسط النقل ضوئياً ، هذه التقنية توفر عرض مجال كبير .

### ١-٢-٢- تخطيط الشبكة :

يوجد عدة أشكال لاتخطيط الشبكة:

- ١- نقطة إلى نقطة : point to point و هي الأبسط حيث يتم ربط مرسل و مستقبل وحيدين بينهما زوج من الألياف . يوجد قناتين طرفيتين إدراهما East link و الأخرى West link واحدة للارسال و الأخرى للاستقبال .

قد نستخدم مجمع ضوئي للأخذ أو إضافة القنوات (Optical Add / Drop Multiplexer ) أو لا نستخدم [ ١١ ] . OADM



الشكل ١.١ : شبكة من نقطة إلى نقطة

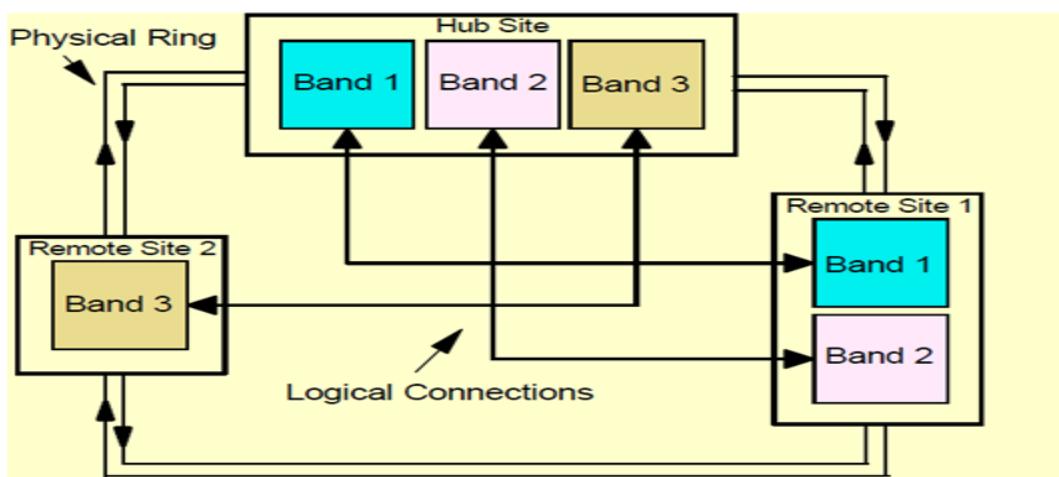
## ٢- الحلقة : Ring

نستخدمها عندما نريد أن نربط عدة مواقع متبعثرة جغرافياً مع بعضها البعض. هنا يوجد أكثر من مرسل مع أكثر من مستقبل . وقد نضيف أو نأخذ عدة قنوات Add / Drop على مسار الإرسال .

## ٣- الحلقة الموزعة : Hubbed – Ring

يوجد عقدة موزعة واثنين أو أكثر من عقد الإضافة والأخذ وكل فناة تنزل في موقع معين يتم تعويضها وإعادة توليدها كهربائياً وباقي القنوات تمر مباشرة ضوئياً بدون إعادة توليد

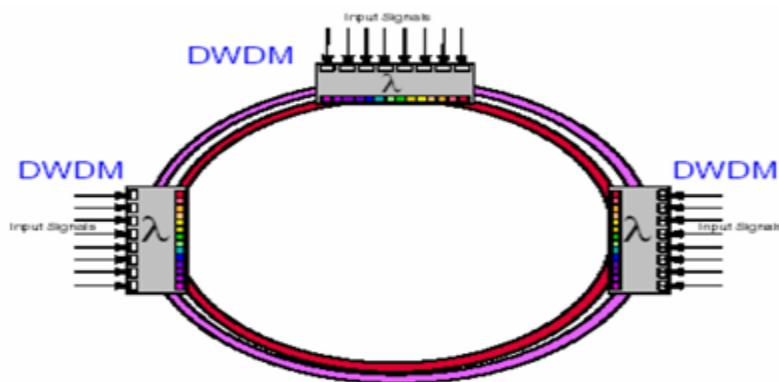
[ ١١ ]



الشكل ٢.١ : حلقة موزعة

#### ٤- الحلقة المختلطة منطقياً : Logical Meshed Ring

و هي حلقة فيزيائية لكن مختلطة منطقياً . حركة البيانات تمشي على مسار فيزيائي شكله حلقة لكن يوجد توصيلات منطقية مختلطة بين مختلف العقد . في السابق كانت الحماية على مستوى الكرت أو الليف الضوئي نفسه أما هنا أصبحت الحماية على مستوى طول الموجة .



الشكل ١.٣ : حلقة مختلطة منطقياً

#### ٣-٢-١ - حماية الشبكة :

نقصد بالحماية قدرة المجمع multiplexer على دعم طريق ثانوي آخر بديل في حال انقطاع الليف أو تعطلت التجهيزه . أكثر أنظمة الحماية المستخدمة هي  $1+1$  حيث يتم إرسال البيانات على مسارين في آن معاً و يتم التبديل من المسار الأصلي إلى مسار الحماية خلال 50ms [ 8 ] .

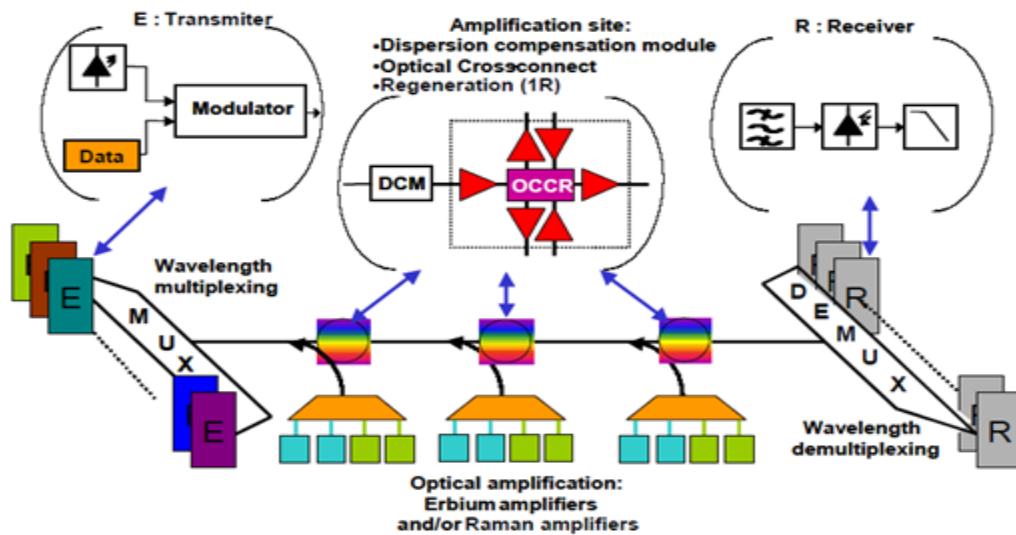
#### ٤-٢-١ - إدارة الشبكة :

قد يكون نظام إدارة الشبكة بسيطاً و هو عبارة عن لوحة تحكم عليها مجموعة مصابيح ملونة تضيء حسب نوع الإنذار و نوع العطل و قد يكون معقداً يعتمد على وجود موجه router و عنوان ip للتجهيزه الموصولة .

## ١-٣-١- نظام الاتصالات الضوئي :

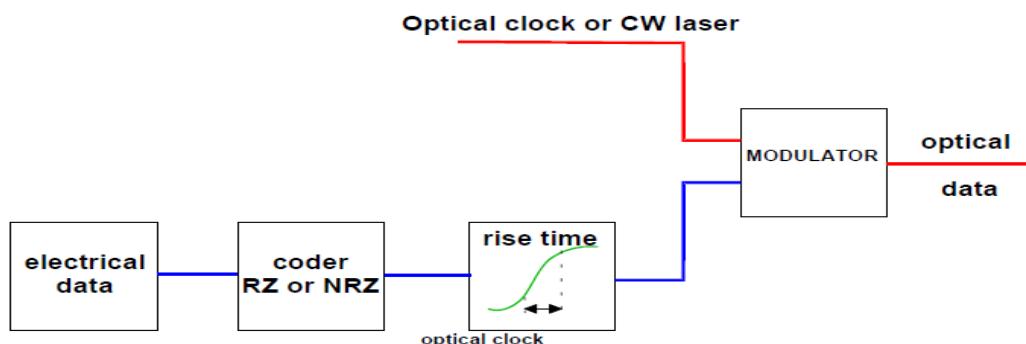
١-٣-١- مكوناته:

يتكون نظام الاتصالات من ثلاثة أجزاء : المرسل , خط النقل , المستقبل .



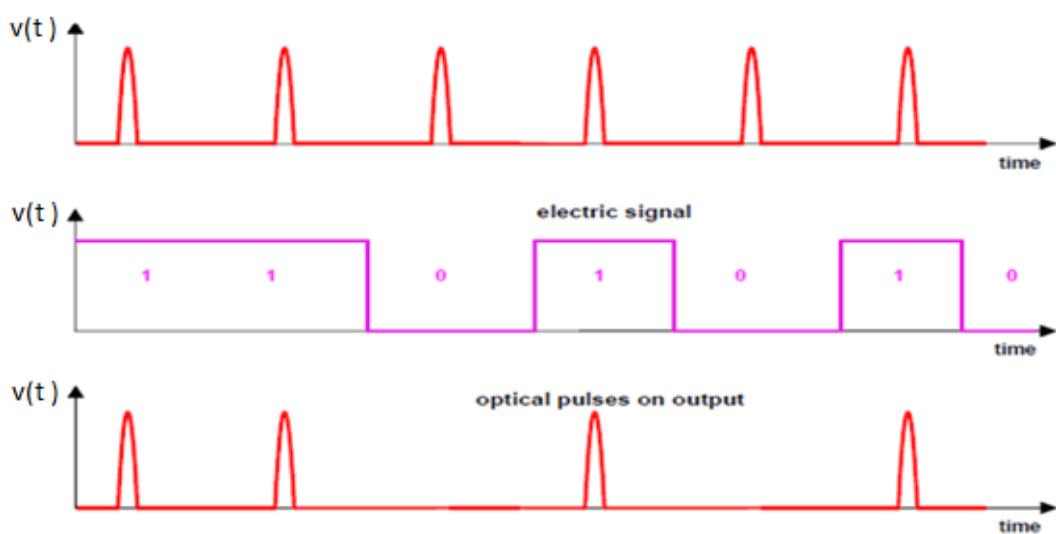
الشكل ٤.٤ : مخطط لنظام نقل ضوئي

يكون المرسل عبارة عن ثلاثة كتل رئيسية : كتلة المعلومات ، كتلة الترميز و كتلة المعدل و الشكل التالي يبين المرسل في النظام الضوئي .



الشكل ٤.٥ : المرسل في النظام الضوئي

تقوم كتلة المعلومات بتوليد المعلومات المرسلة على الخط و تكون هذه المعلومات عبارة عن إشارة كهربائية يتم ترميزها بواسطة الكتلة الثانية و هي كتلة الترميز و يمكن أن ينجز الترميز بعدة طرق مثل (RZ) العودة للصفر و (NRZ) الاعودة للصفر أما الكتلة الثالثة و هي كتلة المعدل فتقوم بتحويل الإشارة الكهربائية إلى ضوئية ليتم نقلها عبر الليف الضوئي [ ١٢ ] . و الشكل التالي يبين طريقة تعديل الإشارة الكهربائية و تحويلها إلى ضوئية .



الشكل ٦.١ : تمثيل سلوك معدّل البيانات

أما بالنسبة لخط النقل فهو عبارة عن الليف الضوئي الذي يحمل المعلومات و يهمنا أن نستثمر هذا الليف قدر الإمكان لذا تم التوصل إلى تقنية التجميع بتقسيم طول الموجة التي تومن سعة إرسال أكبر حيث يمكن تجميع أكثر من قناة على نفس الليف و تكون هذه القنوات متباude عن بعضها بشكل متساوٍ في المجال الطيفي و يسمى هذا العامل البعد بين القنوات و تحدد فعالية التجميع بالنسبة [ ٧ ] :

$$\text{Spectral efficiency} = \frac{\text{Channel\_bit\_rate}}{\text{Channel Spacing}} \quad (1.1)$$

و يتواجد على خط النقل موقع من أجل تعويض الفقد والتشتت . يتم تعويض الفقد باستخدام مكبرات من نوع Raman أو EDFA أما تعويض التشتت فيتم باستخدام وحدة خاصة حيث أن التشتت يؤدي إلى تعريض النبضة فتقوم هذه الوحدة بإعادة النبضة إلى عرضها الأصلي. كما قد يتم استخدام وحدة OADM (Optical Add Drop Multiplexer) لاستخلاص أو إدخال بعض البيانات من أو إلى الإشارة المرسلة. فلاستخلاص البيانات من إشارة ضوئية فإنها ترشح بمرشح ضوئي مناسب و تحول إلى إشارة كهربائية أما لإضافة بيانات للإشارة يتم تحويل الإشارة الكهربائية إلى ضوئية وتجمع مع باقي الإشارات الضوئية.

في الاستقبال يتم فك تجميع الإشارة الضوئية لفصل القنوات المختلفة بواسطة مفகك تجميع De-MUX ثم تحول إلى إشارة كهربائية بواسطة كاشف كهربائي و يتم استخدام مرشح كهربائي لإعادة تشكيل الإشارة الكهربائية . reshaping

### ٢-٣-١- معدل خطأ البتات: ( BER )

يمكن تعريفه بأنه نسبة عدد برات الأخطاء إلى العدد الكلي للبتات و هو ما نقيس به جودة الإرسال و يجب أن تكون قيمته أقل من  $10^{-9}$  و هو يقابل عامل جودة بقيمة ٦ [ ٢ ] . و بما أن أنظمة الاتصالات الضوئية تتكون من مصدر ضوئي أو مرسل, الليف و المستقبل الضوئي فإن التفاعل بين هذه العناصر يجب أن يؤخذ بعين الاعتبار عند تصميم أي نظام اتصالات. يجب أن نأخذ بعين الاعتبار ميزانية القدرة للخط أو الفرق بين مستويات الإرسال و الاستقبال حيث أن بعض القدرة سيتم فقدانها بسبب الربط و الوصلات و التخادم على طول الليف . بالإضافة لوجود معوقات أخرى مثل التشتت و الضجيج. تكون نسبة الإشارة إلى الضجيج عند المستقبل ممثلة بعامل الجودة Q و المرتبط بمعدل خطأ البتات بتكميل غاوسيان [ ٢ ] :

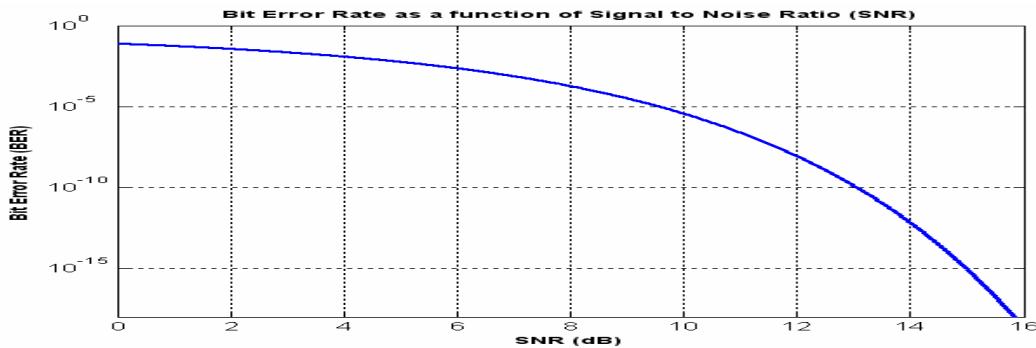
$$BER = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_Q^{\infty} e^{-\frac{Q^2}{2}} dQ \cong \frac{1}{Q\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{Q^2}{2}} \quad (1.2)$$

تحدد حساسية المستقبل عند قيمة معينة ل BER

تعطى العلاقة بين القدرة الضوئية للدخل بالواط و BER بتابع الخطأ الغاوسي المكمل :

$$BER = \frac{1}{2} errorFunction \left( P_{out} - \frac{P_{signal}}{RMS_{noise}} \right) \quad (1.3)$$

إن تابع الخطأ هو عبارة عن تكامل مفتوح لا يمكن حلها مباشرة لذا تم تطوير عدة تقريرات لهذا التكامل و تم الحصول على منحنى نعرف من خلاله حساسية المستقبل تبعاً لـ BER .



الشكل 7.1 : معدل خطأ البتات مع نسبة الإشارة إلى الضجيج

### ٣-٣-١- الألياف الضوئية :

الليف الضوئي هو عبارة عن قطعة من الزجاج أو البلاستيك تنتقل من خلالها إشارات الاتصالات من موقع لأخر على شكل ضوء . هذه الإشارات عبارة عن نبضات رقمية أو سلسلة من الإشارات التماثلية المعدلة تمثل المعلومات التي قد تكون صوت ، موسيقى ، بيانات أو فيديو. هذه الأنماط من المعلومات قد ترسل بواسطة أسلاك معدنية نحاسية أو عن طريق الهواء على ترددات ميكروية ، لكن الليف الضوئي يوفر الكثير من الفوائد الغير موجودة أصلاً في النواقل المعدنية أو الأمواج الترددية [ ٩ ] .

### ١-٣-٣-١- ميزات الليف الضوئي :

تتمثل الميزة الأهم للليف الضوئي بأنه يستطيع نقل معلومات بسعة أكبر لمسافة أطول في زمن قليل جداً مقارنة مع أي وسط اتصال آخر . عندما نقارن أداء نقل البيانات من خلال الليف الضوئي مع أداء النقل من خلال وسط آخر فإن تميز الليف الضوئي يبدو واضحاً . فهو غير

قابل لتدخل الأمواج الكهرومغناطيسية EMI لذلك فإنه يوفر إشارة نظيفة أكثر من الأسلال النحاسية بالإضافة لذلك فإن الإشارة في الليف الصوتي لا تتدحر سريعاً كما هو الحال في الأسلال النحاسية و بالتالي يمكن مده لمسافات طويلة و هو مناسب للبيئات القابلة لانفجار لأنه لا ينقل الكهرباء حيث أن أي شرارة من كابل نحاسي مقطوع قد ينتج عنها انفجارات متعاقبة أما إذا انقطع الليف لا يوجد خوف من صدمة كهربائية و بالتالي يمكن استخدامه بأماكن تواجد تجهيزات و خطوط الطاقة التي تعمل بجهود كهربائية عالية . و بما أنه مصنوع من الزجاج فإنه لا يتآكل و لا يتأثر بالمواد الكيميائية و يمكن دفنه في مختلف أنواع التربة و هو خفيف الوزن و يحتاج لحيز صغير من الفراغ مقارنة مع غيره من الكوابل [ ٩ ] .

### ٢-٣-٣-١ بنية الليف الصوتي :

يتكون الليف الصوتي من نواة يمر فيها الضوء محاطة بغلاف و بالاعتماد على نظرية الانعكاس الداخلي الكلي نستطيع جعل الضوء في النواة ينعكس كلياً عند حدود الغلاف طالما أن زاوية وروده أكبر من الزاوية الحرجة وذلك بجعل قرينة انكسار المادة الزجاجية للنواة أكبر من قرينة انكسار المادة الزجاجية للغلاف .

عادة ما يكون الغلاف و النواة من زجاج السليكا المشهور و مغطى بغطاء بلاستيكي يسمى العازل و هو مخصص لحماية الليف الزجاجي من أي ضغوط ميكانيكية و من الرطوبة . يتوضع فوق الغطاء البلاستيكي غطاء آخر مصنوع من PVC يحمي الليف الصوتي من التمزق.

الليف الضوئي مبين في الشكل التالي



الشكل ٨.١ : بنية الليف الضوئي

### ٣-٣-٣-١- أنماط الألياف الضوئية :

#### - الألياف وحيدة النمط : ( SM )

تستخدم هذه الألياف لنقل إشارة وحيدة في كل ليف ، يكون قطر النواة صغير جداً بحدود (  $9 \mu\text{m}$  ) و تنتقل إشارة ليزرية تحت الحمراء (  $\lambda = 1300\text{nm}, 1550\text{nm}$  ). يكون انتشار الضوء في الليف وفق نمط انتشار وحيد و بمسار وحيد حيث يمكن نقل البيانات بفقد قليل جداً [ ٩ ].

#### - الألياف متعددة النمط : ( MM )

تستخدم هذه الألياف لنقل عدة إشارات في كل ليف ، يكون قطر النواة كبير جداً بالمقارنة مع النوع السابق بحدود (  $62.5 \mu\text{m}$  ) و تنتقل إشارة تحت الحمراء تكون صادرة عن LED . يستخدم هذا النمط في شبكات LAN .

تكون الألياف متعددة النمط إما من النوع الخطوي step - index أو المدرج : [ ٩ ] graded - index

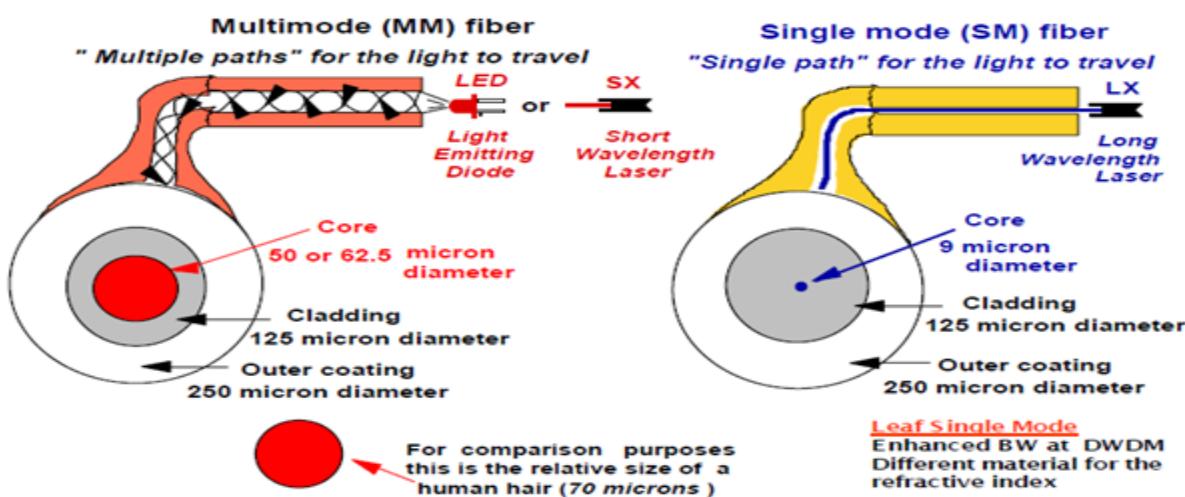
## - النوع الخطوي : Step Index :

يكون الليف مكوناً من نواة مصنوعة من زجاج ذو قرينة انكسار أقل من قرينة انكسار النواة و الفرق بين القرینتين يسبب انتشار الضوء ضمن النواة على طول الليف . بما أن كل نمط من الضوء يسلك طريقاً ضمن النواة فإن النسبة الضوئية سبزداد عرضها خلال الانتقال في الليف مما يؤدي إلى محدودية عرض المجال في هذا النمط من الألياف و هذا سيناقش لاحقاً.

## - النوع المتدرج : Graded Index :

يكون الليف مكوناً من نوع واحد من الزجاج لكنه معالج بحيث أن قرينة الانكسار تتناقص قيمتها بشكل تدريجي كلما ابتعدنا عن مركز الليف ، نتيجة لهذه البنية فإن الضوء سينتشر باتجاه مركز الليف و بما أن الضوء ينتشر بشكل أسرع كلما صغرت قرينة انكسار الزجاج فإن الضوء سينتشر بشكل أسرع كلما ابتعد عن المركز و على عكس ذلك فإن الضوء المنتشر قرب المركز يكون أبطأ .

بهذه الطريقة يمكن زيادة عرض المجال للليف و ينتشر عدد كبير من الأنماط ضمن الليف حيث يمكن أن يصل عددها إلى 100 مرة أكثر من النوع السابق .



الشكل ٩.١ : ليف وحيد النمط و ليف متعدد النمط

وهكذا نكون قد تحدثنا في هذا الفصل عن الشبكات الضوئية و مكونات نظام الاتصالات الضوئي بما فيها الألياف الضوئية أما في الفصل التالي فستتحدث عن أنظمة التجميع بتقسيم طول الموجة .

## الفصل الثاني : أنظمة التجميع بتقسيم طول الموجة WDM

### ١-٢ - مقدمة :

أصبح استخدام الاتصالات الضوئية في السنوات الأخيرة أمراً ملحاً بسبب الحاجة المتزايدة لإرسال الصوت ، الفيديو ، البيانات ، الولوج السريع للإنترنت ، أنظمة البث المتعددة الوسائط وغيرها . إن هذا النمو الهائل في زيادة الطلب على عرض المجال أدى إلى استخدام تقنيات متعددة لزيادة السعة أبرزها تقنية التجميع بتقسيم طول الموجة و التي تعتمد على إرسال عدة أطوال موجية معاً على نفس الليف و تتميز هذه التقنية بعرض مجال واسع و مرونة عالية و قدرة على التطور و هي ذات تكاليف معقولة .

### ٢-٢ - أنواع التجميع : Multiplexing

و هي طريقة تم التوصل إليها لإرسال أكثر من إشارة على نفس خط النقل و ذلك للتخفيف من عبء و كلفة مد كابلات جديدة و يوجد عدة تقنيات للتجميع [ ١٢ ] :

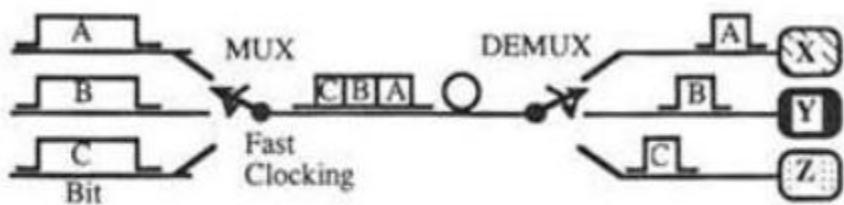
#### ١ - تقنية التجميع بتقسيم الفراغ : (SDM) Space Division Multiplexing

هنا يتم استخدام المزيد من الألياف الضوئية فإذا كانت المسافات قصيرة كانت كلفتها قليلة لكن من أجل مسافات طويلة تصبح مكلفة بسبب كلفة الألياف الممدودة و المضخمات المستخدمة .

#### ٢ - تقنية التجميع بتقسيم الزمن : (TDM) Time Division Multiplexing

يتم تقسيم القناة إلى إطارات زمنية متساوية ( Frames ) و كل إطار مقسم إلى عدة شقوق ( n Slots ) و كل قناة فرعية يكون لها سعة متساوية لـ  $\frac{1}{n}$  من سعة القناة .

يمكن تتنفيذ هذه التقنية في المجالين الضوئي و الكهربائي و كل قناة فرعية ترسل بت أو مجموعة من البتات تعرف بالرزمة ( Packet ) ثم ترسل القناة التالية بت خاص بها و هكذا ثم تعاد العملية كما هو مبين في الشكل التالي



الشكل ١.٢ : تقنية التجميع بتقسيم الزمن

تعاني هذه الطريقة من مشكلة و هي محدودية سرعة عناصر التجميع و التوزيع.

### ٣ – تقنية التجميع بتقسيم طول الموجة : (WDM) Wave Division Multiplexing

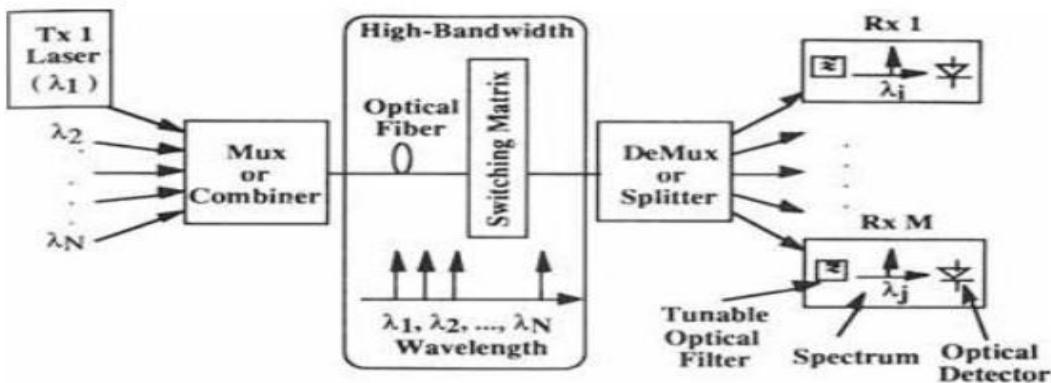
تم بإرسال عدة أطوال موجية تحمل المعلومات بمعدلات نقل عالية على الليف نفسه لكنها تتطلب مضخمات برباع مسطح (Flat gain) لدعم جميع الأطوال الموجية.

تستخدم أنظمة WDM مجمع Multiplexer عند المرسل لجمع الإشارات مع بعضها و موزع De-Multiplexer عند المستقبل لفصل الإشارات عن بعضها . يوجد تجهيزات تقوم بالعملين معاً تسمى Optical Add Drop Multiplexer. في السبعينيات تم إنجاز هذا في المختبرات و أول نظام جمع قناتين فقط لكن في الأنظمة الحديثة تم التوصل إلى ١٦٠ قناة مما وسع السعة من 10Gb/s إلى 1.6Tbps عبر زوج من الألياف . هذا النظام يسمح بتوسيع سعة الشبكة بدون مد المزيد من الكابلات و في كل مرة نريد تطوير الشبكة لا داعي لتبديل الليف و إنما نقوم بتطوير الطرفيات فقط . معظم أنظمة WDM تعمل على ألياف ضوئية وحيدة النمط بنواة ذات قطر  $9\mu\text{m}$  و بعض أنظمة WDM تعمل على ألياف ضوئية متعددة النمط بنواة ذات قطر  $\mu\text{m}$  ( 50 - 62.5 ) [ 15 ] .

## ٣-٢ ميزات WDM :

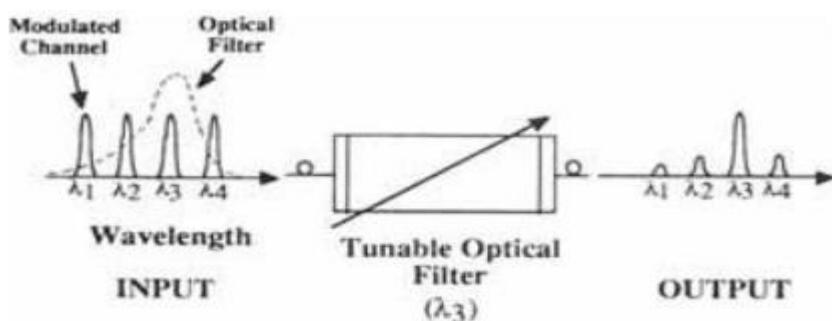
كانت أنظمة WDM في البداية مكلفة و معقدة لكن مع التطور أصبحت أقل كلفة و أسهل للتعامل و تتميز بعرض مجال واسع و مرونة عالية و قدرة على التطور حسب حاجات الزبائن المتزايدة.

الشكل التالي يوضح نظام WDM بسيط



الشكل ٢.٢ : تقنية التجميع ب التقسيم طول الموجة

كل ليزر يرسل ضوء عند طول موجي معين ثم يتم جمع الأطوال الموجية في مجمع إلى ليف واحد . في طرف الاستقبال يتم فصل هذه الأطوال الموجية و بوجود مرشح فإن كل مستقبل سيستقبل طول موجة واحد فقط ، هذا المفهوم يبيّنه الشكل التالي



الشكل ٣.٢ : ترشيح الأطوال الموجية

حيث يوجد ٤ قنوات هي دخل المرشح الضوئي و تكون قمة المرشح مركزة عند القناة المطلوبة ففرضًا نحن نريد أن تمر الموجة الثالثة و يتم حجب باقي القنوات و هذا ما يحدث لكن هذه المرشحات غير مثالية حيث قد يحدث بعض التداخل أو التسميع بين القنوات مما يوجب زيادة المسافة الفاصلة بين القنوات [ ١٥ ] .

ولا بد من الإشارة إلى أن النمو المتزايد للاتصالات و الحاجة المتنامية لإرسال البيانات أدى إلى استخدام السعة العظمى الموضوعة بالخدمة و المخطط لها سابقاً و بالتالي أصبحت الحاجة لساعات جديدة ملحة و لزيادة السعة يوجد ثلاث طرق :

#### ١ - استخدام المزيد من الكابلات :

يكون استخدام المزيد من كابلات الألياف الضوئية مفضلاً في العديد من الحالات خاصة في المناطق الواسعة metropolitan لأن الألياف غير غالية نسبياً لكن إذا لم يتتوفر الحيز الملائم لمد الألياف قد يكون استخدام المزيد من الكابلات غير فعال .

#### ٢ - زيادة معدل إرسال النظام :

زيادة معدل إرسال النظام طريقة غير فعالة من حيث التكلفة لأن ذلك يتطلب تغيير العناصر الالكترونية في الشبكة .

#### ٣ - استخدام نظام WDM :

أثبتت هذه الطريقة أنها الأفضل من حيث الكلفة حيث تسمح بإرسال عدة أطوال موجية مختلفة على نفس الليف مع الاستفادة من المكبرات الضوئية الموجودة سابقاً . و تقييد هذه التقنية في زيادة عرض المجال للألياف الضوئية بدون الحاجة إلى معدلات تعديل عالية عند المرسل و المستقبل .

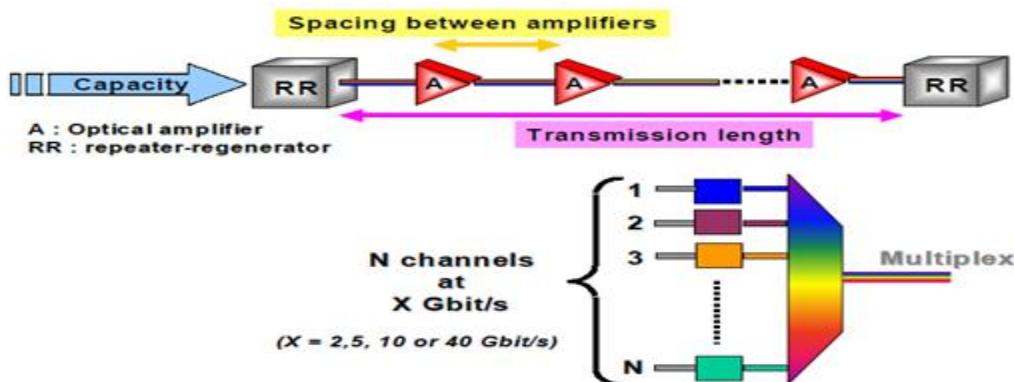
لقد كانت الأجيال الأولى من أنظمة WDM ذات معدلات نقل 2.5Gbit/s و باتخاذ بحدود 25-30dB لكل وصلة و طول الإرسال بحدود 500Km إلا أن عدة تطورات تكنولوجية حدثت أدت إلى التوصل إلى معدل نقل 40Gbit/s لكل قناة لمسافة تصل إلى أكثر من 1000Km وأهم هذه التطورات هي :

- ❖ استخدام تقنيات ترميز تصحيح الخطأ لخوارزميات فعالة تستخدم الترميز الثنائي بما يسمح بكشف و تصحيح الأخطاء و يكون ربح تصحيح الخطأ النموذجي بحدود 6dB.
- ❖ استخدام مضخم رامان Raman الذي يقوم كمضخة بحقن موجة ضوئية في الليف و تكون مزاحة ب 110nm عن الإشارة الضوئية مما يؤدي لتكبير الإشارة الضوئية إلا أن تضخيم رامان يضيف ضجيج للإشارة أكثر من مضخم EDFA الذي يستخدم لياف مشاب بمادة الاربيوم و قادر على تكبير الإشارة لمسافات بعيدة.

#### ٤-٢ - معلمات ( parameters ) أنظمة WDM :

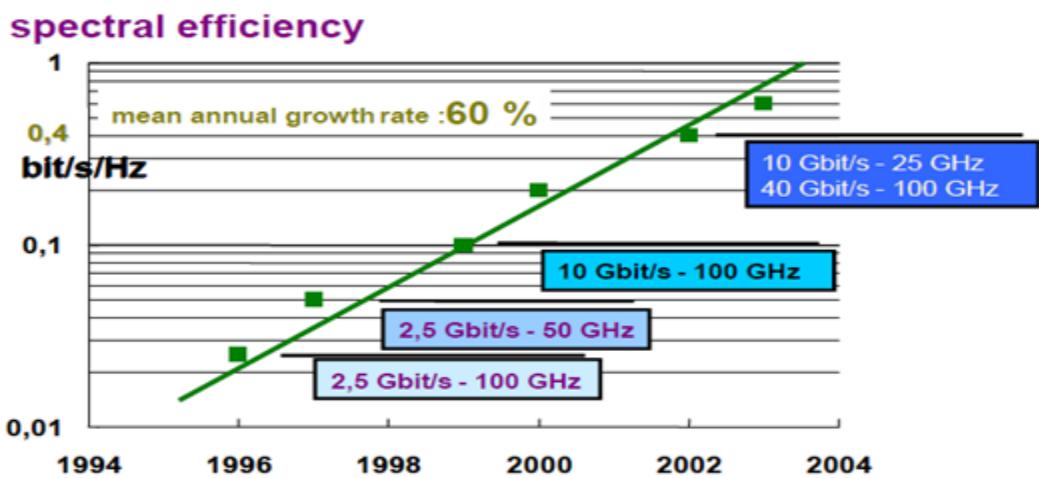
توصف أنظمة الاتصالات بثلاثة معلمات [ ١٤ ] :

- ١ - طول الإرسال و الذي يؤثر على عدد مواقع إعادة توليد الإشارة و هذا الطول محدد بكمية الضجيج عند الاستقبال أي ب OSNR و كذلك محدود بالآثار اللاخطية و التشتت الاستقطابي .
- ٢ - المسافة بين المضخمات ممثلة بطول المسار ب Km و التخادم ب dB. بتخفيض هذه المسافة تزداد OSNR و يزداد طول الإرسال. تحدد هذه المسافة ب 80-120Km لأنظمة النقل البري مع فقد بحدود 20-30dB أما في أنظمة النقل البحري تصل إلى 40Km و بتخادم 10dB.
- ٣ - سعة النظام و التي يحددها عدد القنوات المستخدمة و سعة كل منها.



الشكل ٤.٢ : معلمات أنظمة الاتصالات

تم التوصل إلى نظام WDM لتخفيض كلفة إرسال البت بالثانية عبر كل Km و لتحقيق ذلك نتجه إما لزيادة عدد القنوات لكن النافذة التردية و المضخمات الضوئية و الآثار اللاخطية و مشاكل الترشيح تحد من ذلك أو لزيادة معدل الإرسال لكل قناة و وبالتالي زيادة الفعالية الطيفية مع الزمن كما هو مبين بالشكل التالي و لكن يوجد الكثير من القيود المفروضة على البنية التحتية لأنظمة WDM كلما زدنا معدل الإرسال [ ١٠ ].



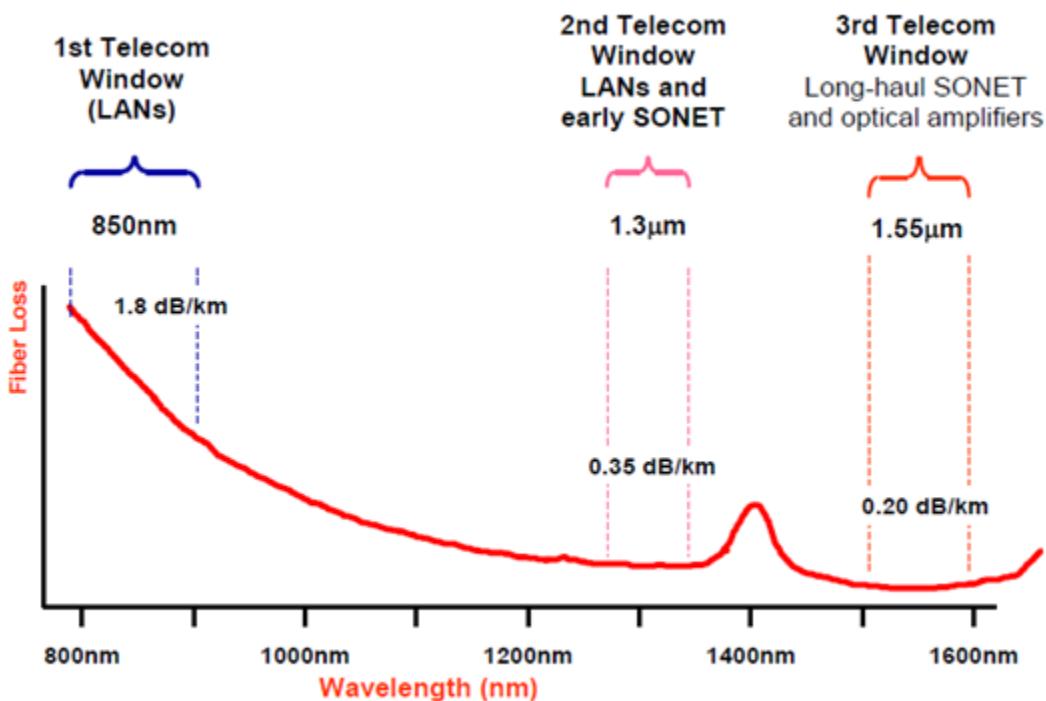
الشكل ٢ .٥ : زيادة فعالية المجال الطيفي

## ٤-٥-٢- تصميف أنظمة WDM

بدأت أنظمة WDM في نهاية الثمانينات باستخدام منطقتى الأطوال الموجية 1310nm و 1550nm و سميت بالأنظمة العريضة Wide Band WDM ثم ظهر جيل ثانى في أوائل التسعينات سمي بالضيق Narrow Band حيث تم استخدام قناتين إلى ٨ قنوات بفارق 400GHz بين القنوات ثم تلاحقت التطورات و ظهرت تقنيات CWDM ، WWDM و DWDM و هي تعتمد نفس مفهوم استخدام عدة أطوال موجية على نفس الليف و تختلف فيما بينها بالمسافة الفاصلة بين القنوات و عدد القنوات و القدرة على تكبير الإشارة [ ١٢ ].

## Coarse Wavelength Division Multiplexing : CWDM – ١

تستخدم هذه التقنية عدد صغير نسبياً من القنوات ( ٤ - ٨ قنوات ) و بفواصل كبير بين القنوات بحدود 20nm و يكون المجال الاسمي للأطوال الموجية بين ( 1310 - 1610 nm ) و يكون معدل إرسال القناة الواحدة بين 3.125 Gb/s ( 1 - ٣.١٢٥ ) .



الشكل ٦.٢ : الأطوال الموجية المستخدمة في أنظمة الاتصالات الضوئية

(Wide spectrum Wave length Division Multiplexing): WWDM-2

تدعم هذه التقنية حتى ١٦ قناة و تكون متباعدة عن بعضها نسبياً و تستخدم هذه التقنية في الأنظمة التي لا تحتاج إلى عدد كبير من القنوات على ليف واحد .

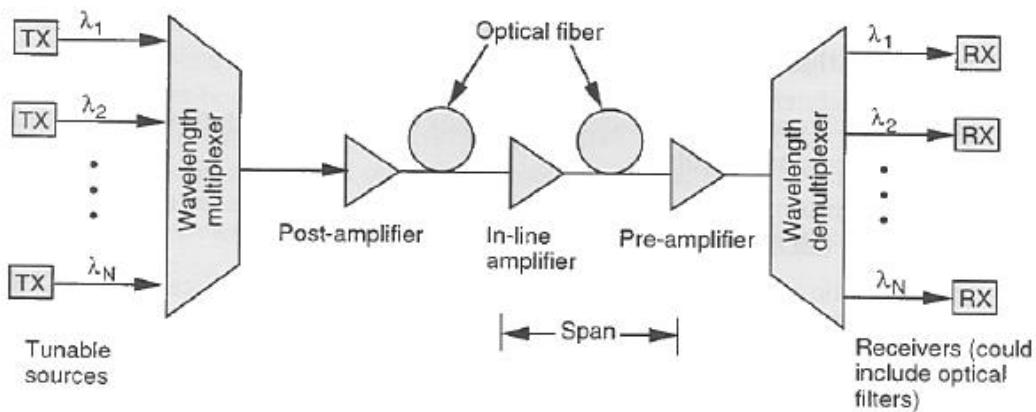
### Dense Wavelength Division Multiplexing : DWDM –3

تستخدم هذه التقنية عدد كبير جداً من القنوات ( 40,80,160 قناة ) و بفواصل صغيرة جداً بين القنوات بحدود (12.5 GHz) 0.1nm أو (25GHz) 0.2nm أو (50GHz) 0.4nm و يكون التردد المرجعي (1552.5 nm) 193.10THz و معدل الإرسال (10-20-40-100)Gb/s .

لقد حققت تقنية DWDM ثورة في عالم الاتصالات حيث زادت السعات بشكل كبير جداً بدون تغيير الليف الضوئي الممدوّد وأصبح بالإمكان نقل الوسائل المتعددة و الفيديو و الصوت و البيانات و أصبحت صيانة و تشغيل و إدارة الشبكة بغاية السهولة.

من أهم العناصر المستخدمة في أنظمة DWDM : المرسل ، المستقبل ، المضخمات ، الموزع ، المجمع .

الشكل التالي يوضح بنية وصلة WDM نموذجية :



الشكل ٧.٢ : بنية وصلة نظام WDM

في طرف الإرسال يوجد عدة مصادر ضوئية معدّلة مستقلة كل واحدة ترسل إشارات عند طول موجة فريد . نحتاج إلى مجمع multiplexer لجمع هذه الإشارات في إشارة طيفية مستمرة ووضعها في الليف و لفصل هذه الإشارات الضوئية إلى قنوات كشف مناسبة و

معالجتها تحتاج إلى موزع demultiplexer في طرف الاستقبال. كما يتم استخدام مضخمات على الطريق لتعويض الفقد في الليف [ ١٥ ] .

## ٦-٢- أنواع المضخمات في أنظمة WDM :

تقسم المضخمات إلى ثلاثة أنواع حسب المهمة التي تؤديها :

١ - ( booster ) post - amplifier :

يوضع هذا المضخم بعد المرسل مباشرة حيث يقوم بتكبير الإشارة قبل إرسالها إلى الليف مهمته الأساسية إنتاج أكبر قدر ممكن من القدرة الضوئية .

٢ : in - line amplifier

يوضع هذا المضخم في منتصف وصلة الليف الضوئي لتعويض الفقد في القدرة بسبب تخاذم الليف و الوصلات و ضياعات الإشارة في الشبكة . يعتمد عدد المضخمات المستخدمة في الوصلة على طولها .

٣ : preamplifier

يقوم هذا المضخم بتكبير الإشارة قبل وصولها إلى المستقبل مباشرة .

## ٧-٢- أشكال التعديل في أنظمة WDM :

تعاني أنظمة WDM من بعض المشاكل مثل الآثار اللاخطية ، التشتت اللوني CD ، تشتت النمط الاستقطابي PMD و ضجيج الانبعاث التلقائي المكبر و غيرها مما يحد من سعة و مسافة الإرسال لذا تم استخدام أشكال متطرفة من التعديل للتغلب على هذه المشاكل و يوجد تقنيتين أساسيتين للتعديل :

التعديل المباشر(الداخلي) Direct Modulation

التعديل الغير مباشر(الخارجي) External Modulation

## ١ – التعديل المباشر :

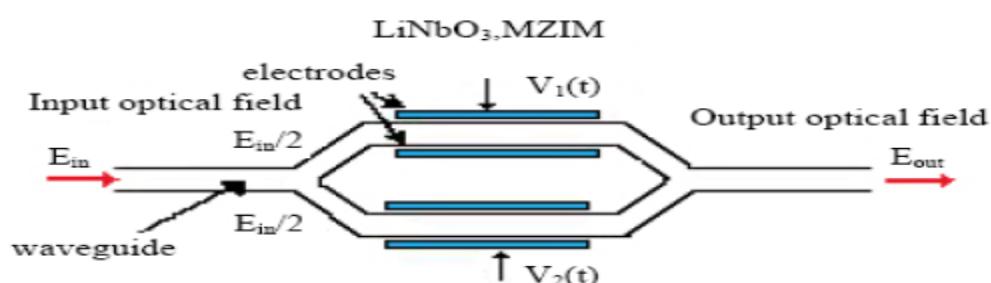
في الثمانينات و التسعينات كان التعديل المباشر للليزرات أنصاف النواقل هو الخيار المستخدم لساعات و مسافات قليلة و هو مفيد و فعال من حيث التكلفة و الأداء لكن من سلبيات هذا التعديل أنه يؤدي إلى اختلاف تردد إشارة الحامل مع الزمن مما يؤدي إلى تعريض النبضة و حدوث تشتيت كما أنه غير فعال عند معدلات الإرسال العالية لأكثر من  $2.5 \text{Gb/s}$  كما أنه يسبب آثار لاخطية .

## ٢ – التعديل الخارجي :

يمكن التغلب على محدودية التعديل المباشر باستخدام تقنية التعديل الخارجي التي تتجنب الآثار اللاخطية . يمكن تحقيق التعديل الخارجي إما بواسطة استخدام معدل كهربائي ( EAM ) أو معدل امتصاص كهربائي ( EOM ) Electro Optical Modulator . Electrical Absorption Modulator

❖ يعمل EOM وفقاً لنظرية الأثر الكهربائي حيث أن قرينة انكسار المادة تتغير حسب الجهد الكهربائي المطبق . على مر السنوات كان دليلاً الموجة للمعدل الكهربائي مكاماً على لوحة من نيوبات الليثيوم (  $\text{LiNbO}_3$  ) و يتميز بفعالية عالية و فقد قليل و بسهولة في التصنيع . من أشهر المعدلات هو معدل ماك زيندر ( Mach - Zehnder interferometer ) المتوضع على  $\text{LiNbO}_3$  ( MZIM ) وهو مستخدم بشكل واسع في أنظمة الاتصالات بمعدلات إرسال  $2.5, 10, 40 \text{Gb/s}$

الشكل التالي يبين بنية MZIM المتوضع على  $\text{LiNbO}_3$  [ ١٨ ].



الشكل ٨.٢ : بنية معدل ماك زيندر

ينقسم الضوء الداخل إلى المعدل إلى ذراعين حيث يقوم مقسّم القدرة بتقسيم القدرة الضوئية للإشارة . كل ذراع من  $\text{LiNbO}_3$  يستخدم طور تعديل كهربائي لتغيير طور حامل الضوء و عند خرج MZIM يتم جمع طوري التعديل و مداخلهما مع بعضهما .  
إن  $V_1(t)$  و  $V_2(t)$  هما جهاذا الدخل المطبقين على ذراعي المعدل .

❖ إن **EAM** هو شكل آخر من أشكال التعديل الخارجي الممكن تصنيعه باستخدام تقنية ليزرات أنصاف النوافل و هذا النوع من التعديل يتطلب جهد  $V = 3-2$  و هو أقل من السابق الذي يحتاج  $V = 5-7$ .

بشكل عام نكون قد تحدثنا في هذا الفصل عن أنواع التجميع و ميزات تقنية WDM و أنواعها وأنواع المضخمات و أشكال التعديل أما في الفصل التالي فسنتحدث عن معوقات نقل الإشارة في أنظمة الاتصالات الضوئية.

## الفصل الثالث : معوقات نقل الإشارة في أنظمة الاتصالات الضوئية

### ١-٣ - مقدمة :

يوجد العديد من العوامل التي تدهر أداء نظام WDM فعندما يتم إرسال إشارة ضوئية على ليف فإنها تعاني من تأثيرات خطية و لاخطية في الليف.

الآثار الخطية هي : الفقد أو التخادم (Attenuation) ، ضجيج الإصدار التلقائي المضخم (Amplified Spontaneous Emission Noise) ASE ، التشتت اللوني CD ( Chromatic Dispersion ) و تشتت النمط الاستقطابي Polarization ( PMD ) . ( Mode Despersion )

الآثار اللاحطية : تبعثر رaman المحتوى ( SRS ) ، تبعثر بريلوين المحتوى ( SBS ) ، تعديل الطور الذاتي ( XPM ) ، تعديل الطور المتعارض ( SPM ) ، خلط الأمواج الأربع ( Four Wave Mixing ) و خلط الأمواج الأربع ( Cross Phase Modulation ) . FWM .

### ٢-٣ - الآثار الخطية :

#### ١-٢-٣ - تخادم الليف : ( Fiber Attenuation )

يعتبر التخادم من أكثر العوامل تأثيراً على انتشار الإشارة فهو يحد من مسافة النقل في الليف و يعطى هذا العامل كمواصفة من مواصفات كل نمط معين من الألياف و له علاقة بمادة تصنيع الليف . يعطى عامل الفقد  $\alpha$  بالـ  $\text{dB} / \text{Km}$  و يعطى تخادم القدرة في الليف الضوئي بقانون بير Beer's law :

$$P_{out} = P_{in} \exp(-\alpha L) \quad (3.1)$$

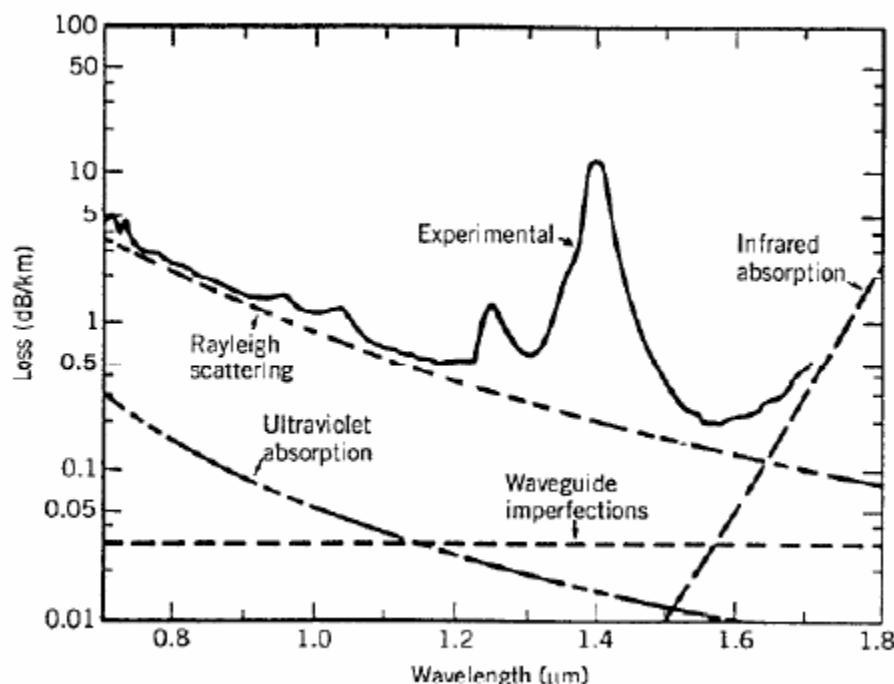
حيث  $\alpha$  معامل التخادم ،  $P_{in}$  هو قدرة الدخل الضوئية ،  $P_{out}$  قدرة الخرج الضوئية و  $L$  هو الطول الكلي لليف .

يمكن التعبير عن معامل التخادم بالعلاقة التالية :

$$\alpha (\text{dB / Km}) = -\frac{10}{L} \log_{10} \frac{P_{out}}{P_{in}} \quad (3.2)$$

و بسبب التطور في تصنيع الألياف فقد تم تخفيض معامل التخادم إلى أدنى مستوياته حيث وصل إلى  $0.2 \text{ dB / Km}$  عند  $1.55 \mu\text{m}$  .

الشكل التالي يبين الفقد في ليف وحيد النمط

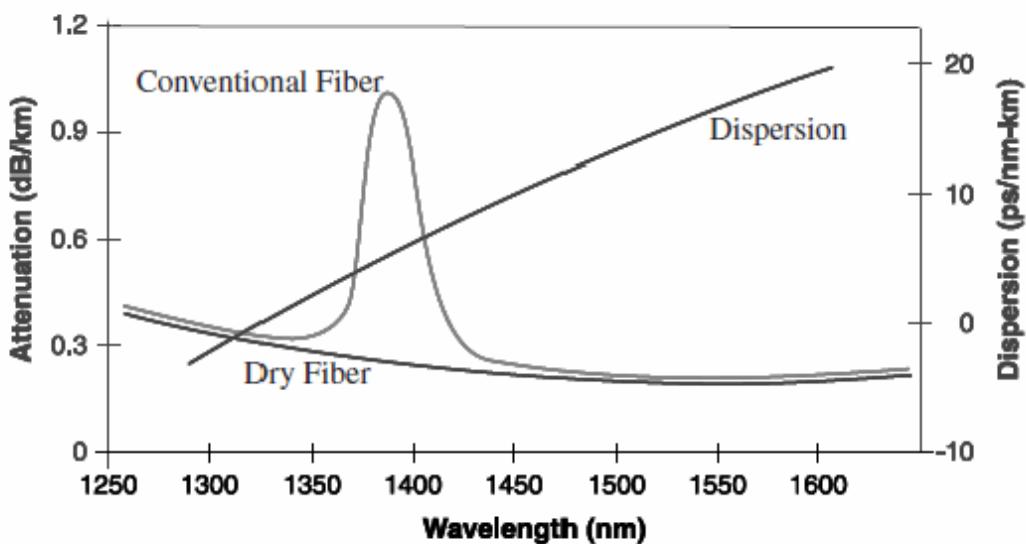


الشكل ١.٣ : الفقد في ليف SM مع تغير طول الموجة

من أكثر العوامل المسببة لفقد الليف الامتصاص Absorption و تشتت رايلي Scattering .

## ❖ الامتصاص :

ينتج الامتصاص من المادة نفسها intrinsic absorption حيث أن كل مادة تمتلك حزمة معينة من الترددات بسبب الحركة الاهتزازية للذرات و الجزيئات فيها فمن أجل السيليكون الزجاجي يحدث الامتصاص عند UV و IR . كما ينتج الامتصاص من الشوائب الموجودة في الليف impurities و أبرز هذه الشوائب شاردة الهيدروكسيل حيث يوجد قمة ( Peak ) للتخادم عند الأطوال الموجية  $\mu\text{m}$  (1.39, 1.24, 0.95) وقد تم تقليل أثر شاردة الهيدروكسيل في الألياف الجافة بحيث احتوى الامتصاص عند  $1.39\mu\text{m}$  و المنحنيات التالية تبين ذلك .



الشكل ٢.٣ : التشتت و التخادم لأنواع مختلفة من الألياف مع طول الموجة

## ❖ تشتت رايلي :

يحدث بسبب توضع جزيئات الزجاج بشكل عشوائي بسبب التسخين أثناء التصنيع وبعد أن يبرد هذا الزجاج و يتصلب تتجدد الجزيئات في هذه الأماكن العشوائية مما يؤدي إلى عشوائية في الكثافة و بالتالي قرينة انكسار عشوائية و من الشكل ١.٣ يتبيّن معناً أن أي

طول موجي تحت  $0.8\mu\text{m}$  غير مستخدم في أنظمة الاتصالات البصرية بسبب تشتت رايلي .

٢-٢-٣ - ضجيج الإصدار التلقائي المضخم : ( ASE ) Amplified Spontaneous Emission Noise ( ASE ) هذا الضجيج هو المهيمن في المضخم الضوئي و هو ناتج عن الاتحاد التلقائي بين الالكترونات و الثقوب . بسبب التفاعل اللاخطي بين ضجيج الإصدار التلقائي الناتج عن المضخم و الإشارة فإن ASE يكبر خلال انتشار الإشارة . إن كمية الضجيج المتولدة عن المضخم تعتمد على عدة عوامل مثل ربح المضخم و عرض مجال الضجيج فإذا تم توصيل عدة مضخمات متسلسلة لتعويض الفقد على طول الليف فإن ASE سيزداد لأن كل مضخم سيضخم ASE المتولد في المضخم السابق .

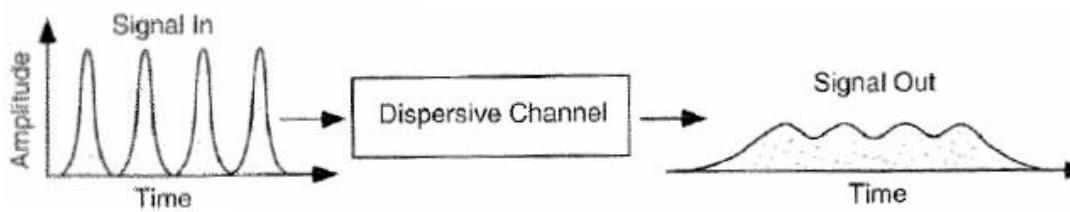
لحل هذه المشكلة تم الاعتماد على مضخمات تعتمد على إشبابة الليف بالإربيوم ( EDFA ) وهي مستخدمة بشكل واسع في أنظمة الاتصالات الأرضية و البحرية و توفر ربح عالي , عرض مجال كبير و معامل ضجيج منخفض ( Noise Figure ) و يمكن ربط العشرات منه تسلسلياً [ ٢١ ] .

### ٣-٢-٣ - التشتت :

في هذه الأيام تتطور الاتصالات الضوئية نحو استخدام سرعات عالية و لمسافات طويلة جداً و قد ساعد دخول تقنية مكبر Erbium – Doped Fiber Amplifier ( EDFA ) في زيادة سعة أنظمة الاتصالات و لمسافات طويلة كما تم الحد من مشكلة التخادم في الألياف إلى حد كبير و مع أن هذه التقنية ترفع القدرة الضوئية للإشارة لكنها تجلب آثار لاختطية كالتشتت و الذي يحد من زيادة سعة و مسافة الإرسال .

يعتبر التشتت من العوامل المفتاحية المؤثرة في نقل البيانات عبر الليف الضوئي حيث يقوم بتعريف النسبة الضوئية خلال النقل مما يؤدي إلى زيادة السوء في نموذج العين للإشارة الضوئية و يزداد معدل خطأ البت BER في النظام و يتدهور أداء النظام . لزيادة سعة الاتصال و توسيع مسافة النقل و تحسين جودة الاتصال يجب تقليل التشتت .

الشكل التالي يبين كيف أن التشتت يحد من سعة المعلومات المرسلة.



الشكل ٣.٣ : تعریض النبضة بسبب التشتت

### ١-٣-٢-٣ - أنواع التشتت :

يوجد ثلاثة أنواع رئيسية للتشتت [١٣] :

#### ١ - تشتت المادة : Material Dispersion

يحدث تشتت المادة بسبب اختلاف قرينة الانكسار لمادة الليف مع اختلاف الطول الموجي للإشارة الضوئية المنتشرة في الليف و بسبب هذا الاختلاف ستنتشر الأطوال الموجية بسرعات مختلفة في وسط الانتشار فإذا كان الوسط مشتملاً على عرض النبضة . و يعبر عنه بالعلاقة التالية :

$$\Delta \left( \frac{\tau}{L} \right) = - M \Delta \lambda \quad (3.3)$$

حيث :  $\tau$  عرض النبضة ,  $L$  طول الليف  
 $M$  تشتت المادة ,  $\Delta \lambda$  العرض الطيفي للمنبع

#### ٢ - تشتت دليل الموجة : Waveguide Dispersion

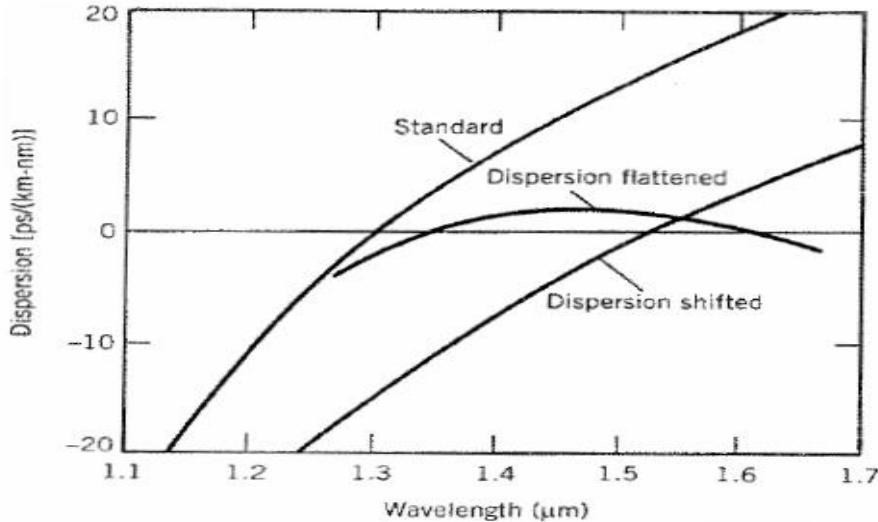
و هو تابع للشكل الهندسي للدليل الموجي للياف و تغيره مع تغير طول الموجة و يعتبر تشتت دليل الموجة الأصغر من حيث المطال مقارنة مع تشتت المادة و التشتت النمطي و يمكن

إهماله في الألياف متعددة النمط لكنه ملحوظ في الألياف وحيدة النمط . قيمته تعتمد على تصميم الليف و تختلف حسب طول الموجة . يعطى تشتت دليل الموجة بالعلاقة التالية :

$$\Delta \left( \frac{\tau}{L} \right) = -M_g \Delta \lambda \quad (3.4)$$

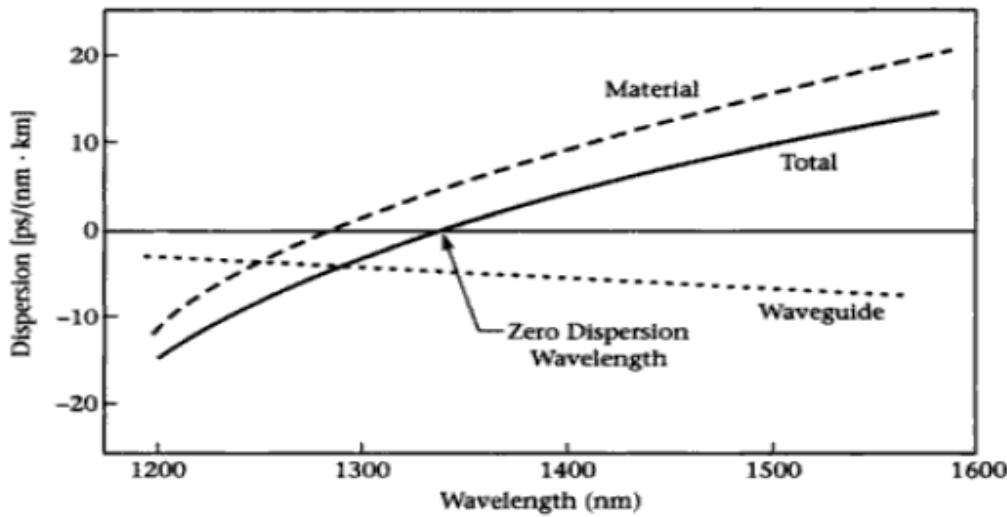
حيث  $M_g$  تشتت دليل الموجة

يمكن تصميم ألياف بتشتت قليل عند  $\mu\text{m}$  1.55 و تسمى بالألياف مزاحة التشتت Dispersion Shifted Fibers . كما أنه من الممكن تصميم ألياف بتشتت قليل نسبياً في Dispersion Dispersion أو مسوية التشتت المجال  $\mu\text{m}$  ( 1.3 - 1.6 ) و تدعى بالألياف مسطحة أو مسوية التشتت Flattened Fibers و الشكل التالي يبين اعتماد التشتت على طول الموجة لأنواع الألياف المختلفة .



الشكل ٤.٣ : التشتت لعدة أنواع من الألياف مع طول الموجة

الشكل التالي يبين مطال تشتت دليل الموجة و تشتت المادة لنواة من السيليكا للليف وحيد النمط و يظهر أنه عند  $1320\text{nm}$  نحصل على تشتت صفرى و هو محصلة تشتت المادة و تشتت دليل الموجة أما عند  $900\text{ nm}$  و  $1550\text{ nm}$  يسيطر تشتت المادة [ ١٣ ] .



الشكل ٣.٥ : أنواع التشتت مع طول الموجة

تكمن آثار تشتت المادة و تشتت دليل الموجة في تعريض النبضة المنتشرة في الليف وحيد النمط مما يؤدي لتراسب البيانات فوق بعضها البعض مما يحدث تداخل بالمعلومات و تؤدي إلى الحد من معدل نقل البيانات و صعوبة بالكشف عند طرف الاستقبال و هذا ما يعرف بالتشتت اللوني أي يمكن القول أنه للحصول على التشتت اللوني يتم جمع كل من تشتت المادة و تشتت دليل الموجة كما يلي :

$$\Delta \left( \frac{\tau}{L} \right) = -(M + M_g) \Delta \lambda \quad (3.5)$$

و تأتي تسمية التشتت اللوني بهذا الاسم من اعتماده على الأطوال الموجية و يزداد أثره كلما زاد عرض الانتشار و هذا التشتت يقلل من مسافة الإرسال و نعرف طول التشتت  $L_D$  بالمعادلة التالية :

$$L_D = \frac{10^5}{DB^2} \quad (3.6)$$

حيث يعطى  $L_D$  بالـ Km و  $B$  بالـ Gb/s (معدل الإرسال) و  $D$  بالـ (ps/nm.Km) (معامل التشتت ) و من الملحوظ من المعادلة أنه كلما زاد معدل الإرسال يزداد أثر التشتت

اللوني وهو ناتج عن ارتباط طول الموجة بقرينة انكسار الليف ( $\lambda$ ) و سرعة انتشار الضوء في الليف تختلف عن سرعة انتشار الضوء في الخلاء حسب قرينة انكسار الليف

$$v = \frac{c}{n(\lambda)} \quad (3.7)$$

يمكن تخفيف التشتت اللوني باختيار الليف بشكل مناسب حيث يوجد ألياف يكون التشتت فيها معدوماً عند أطوال موجية معينة.

### ٣- التشتت النمطي : ( Modal Dispersion )

إن التشتت النمطي ناتج عن حقيقة أن الضوء يمكن أن ينتشر وفق مسارات مختلفة أو بعدة أنماط في الليف متعدد النمط و بما أن هذه المسارات ليست بنفس الطول فإن الأنماط المختلفة ستسير بسرعات مختلفة و عند الاستقبال سيحدث تأخير.

ويعطى بالعلاقة التالية :

$$\Delta \left( \frac{\tau}{L} \right) = \frac{n_1 \Delta}{c} \quad (3.8)$$

$$\Delta = \frac{n_1 - n_2}{n_1} \quad (3.9)$$

حيث :  $n_1$  قرينة انكسار نواة الليف

$n_2$  قرينة انكسار غلاف الليف

في الألياف متعددة النمط يوجد نوعين سائدين للتشتت نمطي modal و لوني chromatic فيما يخص التشتت اللوني يعطى عرض المجال الضوئي عند 3dB بالعلاقة التالية :

$$f_{opt,3-dB} \leq \frac{1}{2\delta\tau} \text{Hz} \quad (3.10)$$

أما عرض المجال الكهربائي فيعطي بالعلاقة التالية :

$$f_{Elec,3-dB} = 0.71 f_{opt,3-dB} = \frac{0.35}{\delta\tau} \text{Hz} \quad (3.11)$$

أما فيما يخص التشتت النمطي يعطى عرض المجال الضوئي كالتالي :

$$BW = \frac{1}{\delta\tau} = \frac{2cn_2}{LNA^2} \quad (3.12)$$

$$NA = \sqrt{n_1^2 - n_2^2} \quad (3.13)$$

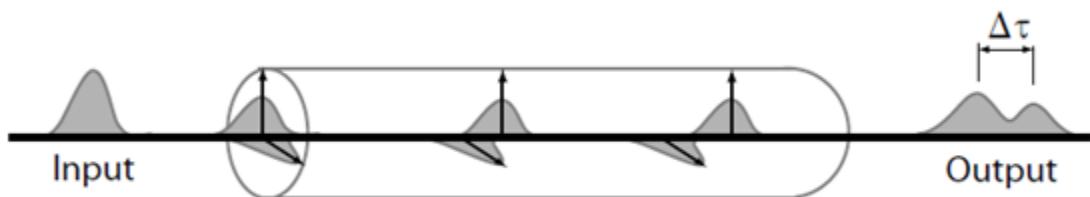
يمكن معرفة عرض المجال الكلي الضوئي لليف متعدد النمط من العلاقة [ ٤ ] :

$$\frac{1}{BW^2_t} = \frac{1}{BW^2_{chrom}} + \frac{1}{BW^2_{modal}} \quad (3.14)$$

و يعتبر تشتت النمط الاستقطابي PMD حالة خاصة من التشتت النمطي و يكون ناتج عن عدم تناظر نواة الليف و عن شوائب الليف المتشكلة أثناء التصنيع.

### تشتت النمط الاستقطابي : PMD

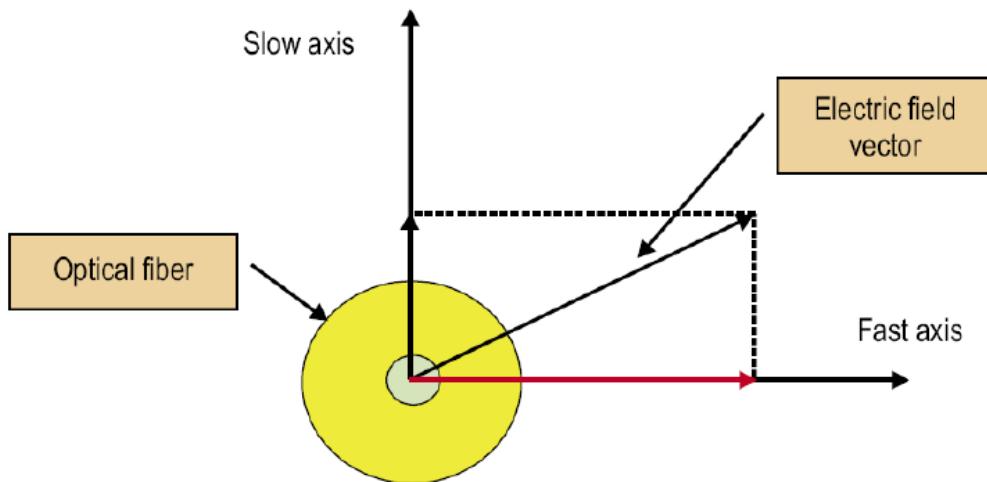
يعتبر هذا التشتت من العوامل المؤثرة في أنظمة DWDM و الأنظمة ذات معدلات الإرسال العالية فهو يحد من مسافة الإرسال و ناتج عن ظاهرة الانكسار المضاعف birefringence الموجودة في كافة أنواع الألياف و هذه الظاهرة ناتجة عن وجود نمطي انتشار للموجة الكهروطيسية المؤلفة من مركبتين متعامدتين تنتشران بشكل مختلف حسب قرينة الانكسار و بالتالي تصبح مركبة أسرع من مركبة و عند الاستقبال تصلان بأوقات مختلفة أي يحدث تأخير يسمى تأخير اختلاف المجموعة DGD ( Differential Group Delay ) فإذا كان هذا التأخير ملحوظاً مقارنة مع فترة البث سيزداد عرض النبضات المرسلة حتى تتدخل مع بعضها و يصبح من الصعب كشفها .



الشكل ٦.٣ : تشتت النمط الاستقطابي

يمكن تحديد تشتت النمط الاستقطابي بأربعة محددات رئيسية :  
- تأخير PMD ب ps أو متوسط DGD -

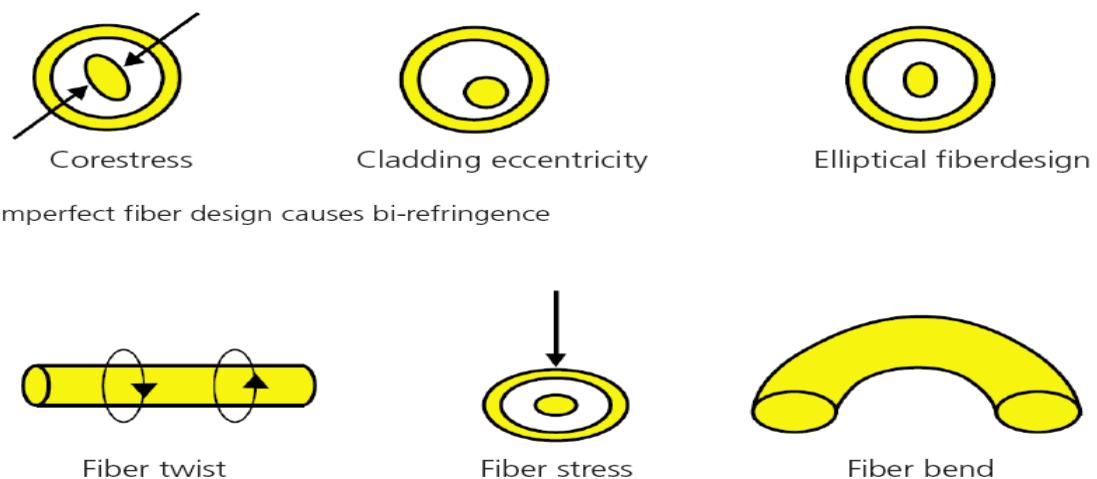
- معامل PMD ب  $\text{ps}/\sqrt{\text{Km}}$  : يربط بين تشتت النمط الاستقطابي و طول الليف.
- تأخير PMD من المرتبة الثانية ب  $\text{ps/nm}$  أو  $\text{DGD2}$
- معامل PMD من المرتبة الثانية ب  $\text{ps}/(\text{nm.Km})$  أو  $\text{PMD2}$



الشكل ٧.٣ : فكرة الاستقطاب

: Bi-refringence الانكسار المضاعف

تعتبر الألياف الضوئية ذات انكسار مضاعف بشكل خفيث حيث تظهر هذه الصفة عندما تختلف قيمة معامل قرينة الانكسار مع وضع الاستقطاب لإشارة الدخل الضوئية . يعتبر السبب الرئيسي وراء هذا الانكسار المضاعف مشاكل في التصنيع أو بسبب الجهود الخارجية المطبقة على الكابل و الالتواءات و الانحاءات.



الشكل ٨.٣ : أسباب الانكسار المضاعف

يعبر  $\Delta\tau$  عن تأخير المجموعة التفاضلي ( differential group delay ) DGD بين المركبين المتعامدين و تتغير إحصائياً حسب توزيع ( distribution ) ماكسويل المعطى كما يلي [ ٥ ] :

$$\rho(\Delta\tau) = \sqrt{\frac{2}{\pi}} \frac{\Delta\tau^2}{\sigma^3} e^{-\frac{\Delta\tau^2}{2\sigma^2}} \quad (3.15)$$

التوزيع يحدد ب  $\sigma$  المرتبطة ب  $\Delta\tau_{avg}$  و هو متوسط  $\Delta\tau$

$$\sigma = \frac{\sqrt{2\pi}\Delta\tau_{avg}}{4} \quad (3.16)$$

$$\Delta\tau_{avg} = PMD \times \sqrt{L} \quad (3.17)$$

طول الليف  $L$

تصبح زناده معدل الإرسال أصعب بوجود PMD و حسب نوع الليف تختلف هذه القيمة

انحدار التشتت ب ps/Km. nm <sup>2</sup>	التشتت ب ps/nm.Km	نوع الليف
0.08	17	SMF
-0.45	-90	DCF
0.085	4.2	LEAF
0.045	4.5	Truewave
0.057	8	Teralight

الجدول ١.٣ : مواصفات الألياف الرئيسية في الاتصالات

تكون سماحية التشتت المترافق حوالي 10Gbit/s عند 1000ps/nm لمسافة 60Km على ليف من نوع G652 أو ما يسمى SSMF ( Standard Single Mode Fiber ) ولكن عند 40Gbit/s تكون قيمة التشتت 60ps/nm على نفس نوع الليف و غالباً ما يتم تعويض هذا التشتت بواسطة معرض تشتت Dispersion (DCF) .(Compensation Fiber

إذا كان معدل الإرسال 10Gbit/s وقيمة PMD لليف هي  $0.1\text{ps}/\sqrt{\text{Km}}$  فإن مسافة الإرسال الأعظمية هي :

$$L = \left( \frac{Tb \times 15\%}{PMD_{Fiber}} \right)^2 \quad (3.18)$$

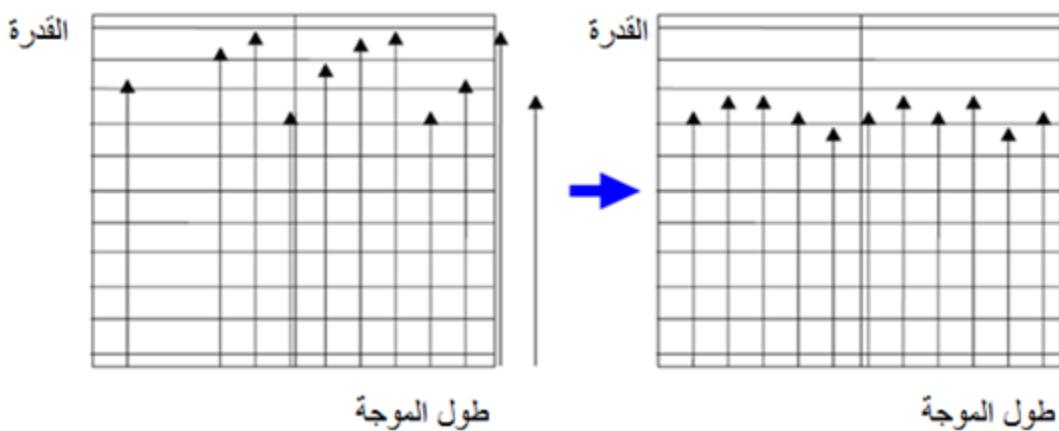
$$L = \left( \frac{10 \times 0.15}{0.1} \right)^2 = 225\text{Km}$$

الجدول التالي يبين قيم PMD لأنواع مختلفة من الألياف و مسافات الإرسال حسب معدل الإرسال :

	G652A (ITU recommandation)	G652D (ITU recommandation)	Good fibre in laboratory	Fibre in field
PMD(in $ps / \sqrt{km}$ )	0.5	0.2	0.04	0.08
10 Gbit/s	900 km	5625 km	140000 km	35000 km
40 Gbit/s	56 km	350 km	8800 km	2200 km
160 Gbit/s	3 km	22 km	550 km	140 km

الجدول ٢.٣ : القيم النظرية لـ PMD

لزيادة سعة النقل في الألياف الضوئية كان الحل استخدام التجميع بتقسيم طول الموجة WDM و بالتالي تمت زيادة عدد القنوات الحاملة ل 2.5Gbit/s من ٤ إلى ٤٠ و حتى إلى ٨٠ قناة لكن ذلك أدى إلى نفاذ المجال الطيفي في C-Band لذا أصبحت زيادة معدل الإرسال حاجة ملحة لكن المشكلة هي أنه عند زيادة معدل الإرسال إلى 40Gbit/s فما فوق يزداد PMD بشكل كبير و بالتالي يجب تعويضه . يتم استخدام مسوبي equalizer لجعل الربح عند الخرج مسطحاً و بالتالي تكون القنوات لها الطاقة نفسها [ ٥ ] .



الشكل ٩.٣ : نظرية مسوبي الربح

العلاقة بين التشتيت و معدل الإرسال :

إن أثر تشتيت سرعة المجموعة على معدل الإرسال يجب أن يتفق مع معيار عدم تراكم النبضات المجاورة فوق بعضها البعض أي أن يكون :  $B \Delta T < 1$

حيث  $B$  يرمز إلى معدل الإرسال و  $\Delta T$  يرمز إلى عرض النبضة بعد التعریض الحاصل نتيجة التشتت . و كلما زاد معدل الإرسال لمسافة نقل معينة كان يجب المحافظة على أثر تشتت أقل ما يمكن

$$\Delta T = DL \delta \lambda \quad (3.19)$$

حيث  $L$  يشير إلى مسافة الإرسال و  $D$  يشير إلى معامل التشتت و  $\delta \lambda$  يشير إلى الجذر التربيعي الوسطي للعرض الطيفي للمنبع الضوئي

$$\delta \lambda = \delta \lambda_{-20} / 16.07 \quad (3.20)$$

حيث  $\delta \lambda_{-20}$  ترمز إلى العرض الطيفي عند  $-20\text{dB}$

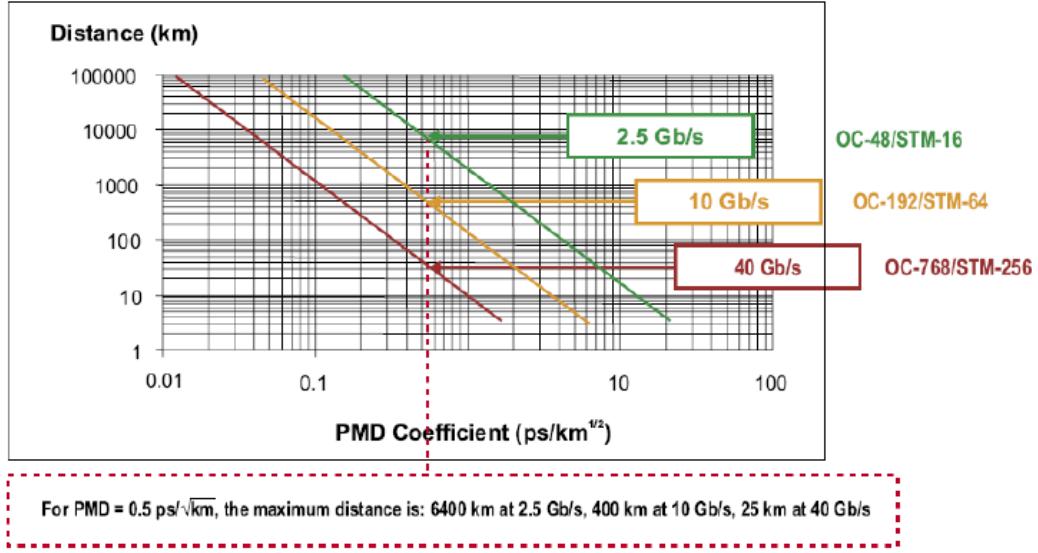
إن DGD المتوسط يسبب تعریض الموجة المرسلة على طول الليف مما يؤدي إلى تشويهها و زيادة معدل خطأ البت BER للنظام الضوئي [ ١٩ ].

إذا عرفنا قيمة تأخير PMD الأعظمية يمكن استخراج الطول الأعظمي المقبول للليف

Bit rate per channel	SDH	SONET	Equivalent timeslot	PMD delay limit	PMD coefficient with 400 km
55 Mb/s	—	OC-1	19.3 ns	2 ns	<100 ps/km
155 Mb/s	STM-1	OC-3	6.43 ns	640 ps	<32 ps/km
622 Mb/s	STM-4	OC-12	1.61 ns	160 ps	<8 ps/km
1.2 Gb/s	—	OC-24	803 ps	80 ps	<4 ps/km
2.5 Gb/s	STM-16	OC-48	401 ps	40 ps	<2 ps/km
10 Gb/s	STM-64	OC-192	100 ps	10 ps	<0.5 ps/km
40 Gb/s	STM-256	OC-768	25.12 ps	2.5 ps	<0.125 ps/km

### الجدول ٣.٣ : قيم PMD حسب معدل الإرسال

في نظام نقل نموذجي يكون معامل PMD الأعظمي كتابع لطول الليف عند قيمة معطاة لمعدل الإرسال كما هو واضح في العلاقة (3.18) التي ذكرناها سابقاً.



الشكل ١٠.٣ : معامل PMD مع مسافة الإرسال

أثر التشتت على أداء نظام الاتصالات :

يوجد عوامل مختلفة تؤدي إلى إضعاف أداء نظام الاتصالات بسبب حدوث التشتت أهم عاملين هما :

١ – Intersymbol Interference : ( تداخل ما بين الرموز )

إن تشتت الليف يعرض النبضات المرسلة . بعد إرسال الإشارة من المرسل تمر بالليف و تعاني من آثار التشتت على طول الطريق و تتدخل مع بعضها فيصبح المستقبل غير قادر على استخلاص الإشارة .

٢ – Mode Partition Noise : ( ضجيج فصل النمط )

يؤثر هذا الضجيج على أداء النظام بسبب الأثر المزدوج لتشتت الليف و الخصائص الطيفية للليزر . بتذبذب القدرة الضوئية لكل خط طيفي و وبالتالي عند انتقال الخطوط الطيفية على طول الليف تتعرض لتأخيرات مختلفة و بالتالي يتغير شكل الموجة للخطوط الطيفية المستقبلة حسب معدل الإرسال و يزداد عرض النبضات المستقبلة .

### ٣-٣- الآثار اللاحظية :

و هي من أهم العوامل التي تحد من أداء أنظمة DWDM و كلما زاد كل من معدل الإرسال و عدد القنوات و صغرت المسافة الفاصلية بين هذه القنوات ظهرت الآثار اللاحظية أكثر.

### ٣-١- صفات الآثار اللاحظية :

#### ١ - التنوع : Diversity

تصنف الآثار اللاحظية إلى التبعثر المحتوى Stimulated Scattering بنوعيه بريلوين SBS و رaman SRS و تأثير كير متضمناً تعديل الطور المتعارض- Cross- ( XPM ) . ( FWM ) Four-Wave Mixing و خلط الأمواج الأربع Phase Modulation .

#### ٢ - التعقيد : Complexity

حيث أن الآثار اللاحظية تنتج من التفاعل بين الضوء و وسط الانتشار .

٣ - الاعتماد الوثيق على معاملات الليف مثل التشتت و مساحة المقطع العرضي الفعال بزيادة مساحة المقطع العرضي الفعال للليف يمكن إنقاذه كثافة القدرة الضوئية في الليف وبالتالي التقليل من العوامل اللاحظية.

#### ٤ - الاعتماد الوثيق على القدرة الضوئية :

تنتج الآثار اللاحظية من التفاعل بين الضوء و ليف النقل فإذا اجتازت القدرة الضوئية قيمة عتبة معينة تنتج الآثار اللاحظية . بتنقلي القدرة الضوئية يمكن تقليل الآثار اللاحظية [ ١٢ ] .

### ٣-٣-٢ - أنواع الآثار اللاخطية:

#### ١ - تبعثر بريليوين المحتوى : ( SBS ) Stimulated Brillouin Scattering

ناتج عن التفاعل بين الإشارة الضوئية والأمواج الصوتية في الليف (acoustic phonons) مما يؤدي إلى رجوع جزء من القدرة إلى المرسل ويوجد عتبة لـ SBS إذا لم تتجاوزها قدرة الإشارة في WDM لا يحدث آثار ملحوظة لهذا التبعثر في النظام.

#### ٢ - تبعثر رaman المحتوى : ( SRS ) Stimulated Raman Scattering

ناتج عن التفاعل بين الإشارة الضوئية واهتزاز جزيئات السليكون مما يؤدي إلى تحول القدرة من الأطوال الموجية القصيرة إلى الطويلة فينحدر طيف الفتوات ذات المطالات المتساوية عند انتقالها عبر الليف وتنخفض القدرة الفعالة للإشارة. يزداد أثر هذا التبعثر كلما زاد عرض مجال الإشارة وقدرة الإشارة في أنظمة WDM.

#### ٣ - تعديل الطور الذاتي : ( SPM ) Self – Phase Modulation

وهو ما يسمى أيضاً فعل كير، ناتج عن اعتماد شدة الضوء على قرينة انكسار الليف مما يؤدي إلى تشوّه النبضات المرسلة على طول الليف وتعريض الخط الطيفي لها مما يؤدي إلى تغيير التردد. تزداد قرينة الانكسار  $n$  بازدياد قدرة الإشارة  $P$

$$n = n_0 + n_2 \frac{P}{A_{eff}} \quad (3.21)$$

حيث  $n_2$  هي قرينة الانكسار اللاخطية

$n_0$  هي قرينة الانكسار الخطية

$A_{eff}$  المساحة الفعالة لقطع الليف

قرينة الانكسار اللاخطية تسبب تغير بالطور للإشارة المرسلة عبر المسافة  $L$

$$\phi_{SPM} = \gamma P L_{eff} = \gamma P_{av} L \quad (3.22)$$

حيث

$$\gamma = \frac{2\pi n_2}{\lambda} \quad (3.23)$$

$$P_{av} = \frac{P}{L} \frac{(1 - e^{-al})}{a} \quad (3.24)$$

$$L_{eff} = \frac{(1 - e^{-al})}{a} \quad (3.25)$$

حيث  $\gamma$  معامل اللاخطية ،  $\lambda$  طول موجة الإشارة ،  $P_{av}$  المعدل الوسطي لقدرة الإشارة  $a$  ضياع الليف ( التخادم ) ،  $L$  طول الليف ،  $L_{eff}$  طول الليف الفعال [29].

#### ٤ – تعديل الطور المتعارض : ( XPM ) Cross Phase Modulation :

و هو مثل SPM من حيث نشأته من اعتماد شدة الضوء على قرينة انكسار الليف لكنه على عكس SPM حيث أنه بسبب الأطوال الموجية الأخرى أي أنه عبارة عن تفاعل بين شدة طول موجي مع أطوار الأطوال الموجية الأخرى عبر قرينة الانكسار اللاخطية و هو يؤدي إلى تعريض طيف الإشارة و حدوث تسميع ( Cross Talk ) و يمكن التحكم به من خلال زيادة المسافة الفاصلة بين القنوات [ ١٤ ].

#### ٥ – خلط الأمواج الأربع : ( FWM ) Four Wave Mixing :

يحدث بسبب الاختلاف في قرينة الانكسار حسب تعدد الإشارات المارة في الليف حيث يتم توليد إشارات عند ترددات خارجية جديدة فإذا انتشرت ثلاثة أمواج  $f_k, f_i, f_j$  في الليف سيتولد ترددات جديدة تعطى بالعلاقة :

$$f_{ijk} = f_i + f_j - f_k \quad (3.26)$$

في WDM عندما تكون المسافة الفاصلة بين القنوات متساوية فإن FWM سيسبب تسميع لا خططي لذا نقوم بجعل هذه المسافات غير متساوية و وبالتالي لا تحتل الترددات الجديدة مكان الترددات الأصلية [ ١٦ ].

### ٣-٤- تعويض التشتت :

يعتبر التشتت من أهم العوامل التي تحد من إرسال الإشارات الضوئية في أنظمة الاتصالات الضوئية . وقد تم العمل على تقليل أثره أكثر ما يمكن من خلال العمل على أطوال موجية محددة كما تم العمل على تعويضه من خلال عدة تقنيات لكل واحدة سينات و ميزات و من أهم هذه التقنيات :

#### A. تضييق العرض الطيفي للمصدر الضوئي :

يمكن الأثر الأهم للتشتت على النسبة الضوئية المرسلة في تعريضها و حجم هذا التعريض خلال مسافة إرسال معينة يعتمد على معامل التشتت الخاص بالليف و على العرض الطيفي للمنبع الضوئي. إن حجم هذا التعريض يزداد مع ازدياد العرض الطيفي للمنبع الضوئي و بالتالي باستخدام ليزر بعرض طيفي قليل يمكن تخفيف التعريض.

#### طرق تخفيف العرض الطيفي للمنبع الضوئي :

##### ١ - استخدام ليزر معدل خارجياً :

يتألف هذا الليزر من منبع ضوئي ثابت و معدل ضوئي . يمنع المصدر الضوئي الثابت التيار المثير من التغير مما يقلل من انحراف الأطوال الموجية الضوئية المولدة و هذا يقلل من معامل زقرقة التردد ( Frequency Chirp Coefficient ) .

##### ٢ - استخدام ليزر من نوع ( Single – Longitudinal Mode ) SLM DFB

يكون هذا الليزر ذو عرض طيفي ضيق و يمكن اعتباره أنه يعمل عند طول موجي واحد و بقدرة ضوئية محددة .

مثلاً ليزر من نوع 1605 SS 32L يكون الطول الموجي له 1550.12nm, بقدرة ضوئية ( 3 , 2 ) dbm و مسافة الإرسال حتى 170Km ( مع مضخمات ) و التشتت الأعظمي ( 6500 ps/nm ) .

B. اختيار ليف انسيابي : ( Stream Lined Fiber ) تم تصنيع الليف 655 . G و هو الليف ذو التشتت المزاح اللاصفرى ( non-zero dispersion shift fiber ) و معامل التشتت اللوني له بحدود  $4\text{ps}/(\text{nm.Km})$  عند النافذة . 1550nm .

C. استخدام تقنيات تعويض التشتت : مثل استخدام ليف لتعويض التشتت ( Dispersion Compensation Fiber ) DCF و هو ليف من نوع خاص ذو تشتت لوني سالب يقوم بإلغاء التشتت اللوني الموجب فمثلاً معامل التشتت اللوني للليف لتعويض التشتت المستخدم مع الليف G.652 تكون قيمته بحدود 90ps/(nm.Km) و عندما يكون طول DCF حوالي خمس طول G.652 يصبح التشتت معدوماً لكن يوجد مشكلة و هي وجود تخامد لـ DCF بحدود 0.5dB/Km و يمكن التغلب عليها باستخدام مكبر EDFA [ ٢٢ ] .

أنواع معارضات التشتت و خصائصها : مع تطور تقنيات تصنيع و تصميم DCM تتراقص الضياع الناتج عن DCM و قلت خصائص المكبرات المستخدمة و زادت OSNR [ ٢٢ ] .

الجدول التالي تبين خصائص معارضات التشتت حسب نوع الليف المستخدم

DCM Specification	Typical Insertion Loss in the DCM Design	DGD Value of the DCM
DCM(S)-for G.652	<2.3	<0.3
DCM(T)-for G.652	<2.8	<0.3
DCM(A)-for G.652	<3.1	<0.4
DCM(B)-for G.652	<4.5	<0.5

DCM(C)-for G.652	<5.8	<0.6
DCM(D)-for G.652	<7.1	<0.7
DCM(E)-for G.652	<8.2	<0.8
DCM(F)-for G.652	<9	<0.8
SS-DCM(3)-G.652	<2	<0.3
SS-DCM(2)-G.652	<2	<0.3
SS-DCM(1)-G.652	<2	<0.3

الجدول ٤ : خصائص معرض التشتت لليف 2 G.652

DCM Specification	Typical Insertion Loss in the DCM Design	DGD Value of the DCM
SS-DCM(20)-C-G.653	<5	<0.5
SS-DCM(15)-C-G.653	<4.1	<0.2
SS-DCM(10)-C-G.653	<3	<0.15
SS-DCM(5)-C-G.653	<1.9	<0.1
SS-DCM(3)-C-G.653	<1.5	<0.1
SS-DCM(2)-C-G.653	<1.2	<0.1
SS-DCM(1)-C-G.653	<1	<0.1

الجدول ٥ : خصائص معرض التشتت لليف 3 G.653

DCM Specification	Typical Insertion Loss in the DCM Design	DGD Value of the DCM
DCM(A)-for G.655 TWRS	<1.9	<0.27

<b>DCM Specification</b>	<b>Typical Insertion Loss in the DCM Design</b>	<b>DGD Value of the DCM</b>
DCM(B)-for G.655 TWRS	<2.4	<0.32
DCM(C)-for G.655 TWRS	<2.9	<0.35
DCM(D)-for G.655 TWRS	<3.4	<0.39
DCM(E)-for G.655 TWRS	<3.8	<0.43
DCM(F)-for G.655 TWRS	<4.3	<0.46

الجدول 6.3 : خصائص معوض التشتت لليف TWRS

<b>DCM Specification</b>	<b>Typical Insertion Loss in the DCM Design</b>	<b>DGD Value of the DCM</b>
DCM(A)-for G.655 Leaf	<3.7	<0.4
DCM(B)-for G.655 Leaf	<4.5	<0.5
DCM(C)-for G.655 Leaf	<5.5	<0.7
DCM(D)-for G.655 Leaf	<6.3	<0.8
DCM(E)-for G.655 Leaf	<7.6	<0.9
DCM(F)-for G.655 Leaf	<8.2	<0.9

الجدول 7.3 : خصائص معوض التشتت لليف LEAF

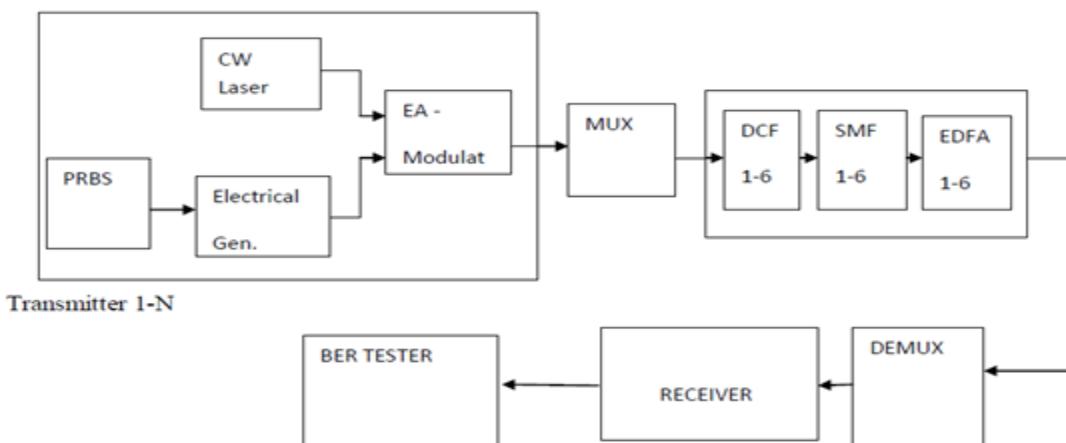
في هذا البحث تم التعرف على أهم العوامل المؤثرة على جودة الإشارة كالاتخامد و التشتت و طرق تعويضها لتحسين نقل الإشارة و في الفصل التالي سنتناول الدراسة المرجعية للبحث .

## الفصل الرابع : الدراسة المرجعية

سنوضح في هذا الفصل عدة أمثلة عن محاكاة تعويض التشتت في أنظمة WDM و دراسة و محاكاة آثار الاستقطاب و دراسة و محاكاة أداء نظام DWDM بتغيير البعد بين القنوات و دراسة تخفيف أثر PMD على طول الليف .

### ٤-١- محاكاة تعويض التشتت في أنظمة WDM :

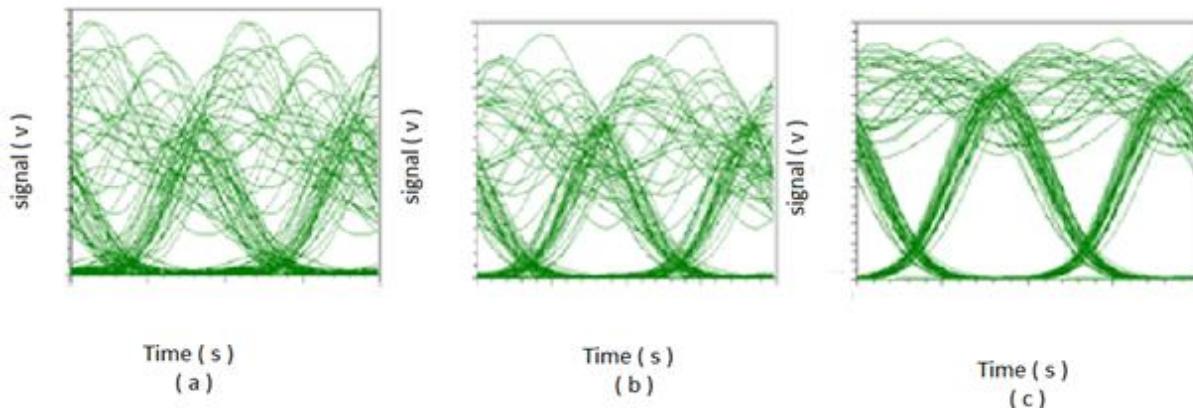
في هذا التطبيق لدينا نظام WDM مصغر مؤلف من مرسل ، خط نقل و مستقبل . يتتألف المرسل من مصدر معلومات يولد إشارة الدخل العشوائية عند معدل برات 10Gbps و من مصدر ضوئي يقوم بتعديل إشارة الدخل و من مجمع Mux يقوم بجمع القنوات المعدلة و هي هنا ٨ قنوات تبدأ عند الطول الموجي 1525nm و بفواصيل محددة فيما بينها بمقدار ١٠٠ GHz. يتتألف خط النقل من مقطع من DCF+SMF+EDFA مكرر ٦ مرات . عند الاستقبال يتم فك القنوات عن بعضها و إرسالها إلى ثمانية مستقبلات متتابعة بمحال مخطط العين لقياس أداء القنوات كلما تغير طول DCF و SMF و الشكل التالي يبين المخطط الصندوقي لهذا النظام [ ١٧ ] .



الشكل ٤.١ : تقنية تعويض التشتت

سنقوم باختيار أطوال متنوعة لكل من DCF و SMF و تحليل نتائج محل مخطط العين لاستنتاج أفضل طول لكل منها .

الشكل التالي يبين النتيجة لاختيار DCF بطول 10Km و تغيير طول SMF بين 40Km و [ ٢٥ ] 80Km .



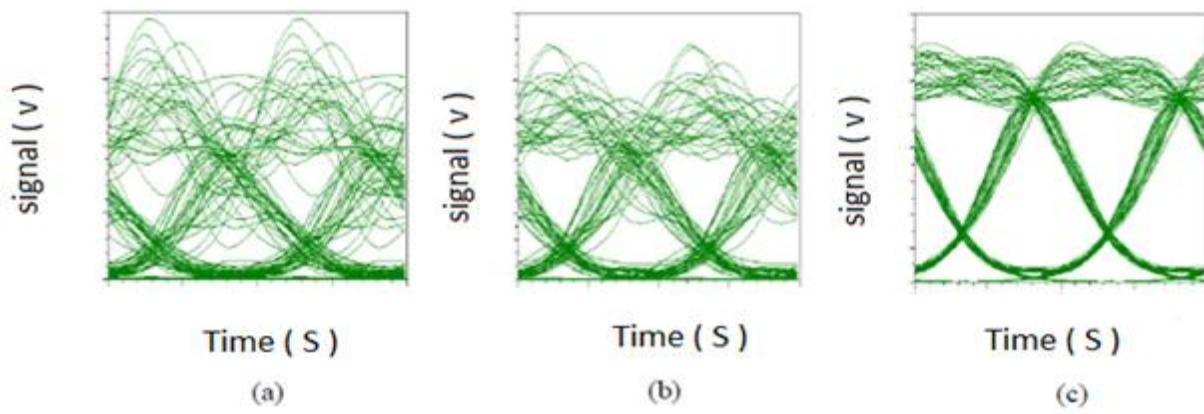
الشكل ٤ . ٤ :  $L ( SMF ) = 40Km , L ( DCF ) = 10Km : a$

$L ( SMF ) = 60Km , L ( DCF ) = 10Km : b$

$L ( SMF ) = 80Km , L ( DCF ) = 10Km : c$

يتبيّن معنا أنّه بزيادة طول الليف تزداد فتحة العين و نحصل على النتيجة المثالية باختيار طول 80Km لأنّ تقدمة التعويض تعتمد على إضافة معامل تشتت سالب .

بإعادة نفس العملية من أجل DCF بطول 15Km كما هو مبيّن بالشكل التالي :



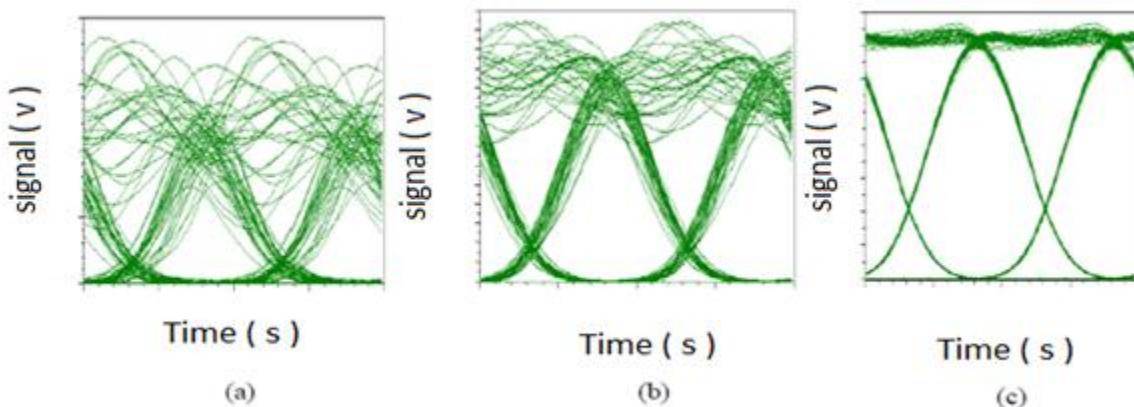
الشكل ٤ . L ( SMF ) = 40Km , L ( DCF ) = 15Km : a : ٣ .

$$L(\text{SMF}) = 60\text{Km}, L(\text{DCF}) = 15\text{Km} : b$$

$$L(\text{SMF}) = 80\text{Km}, L(\text{DCF}) = 15\text{Km} : c$$

نجد أن النتائج تحسنت أي زادت فتحة العين و قل التشبت من أجل DCF بطول 15Km و SMF بطول 80Km .

بإعادة نفس العملية من أجل DCF بطول 20Km كما هو مبين بالشكل التالي :



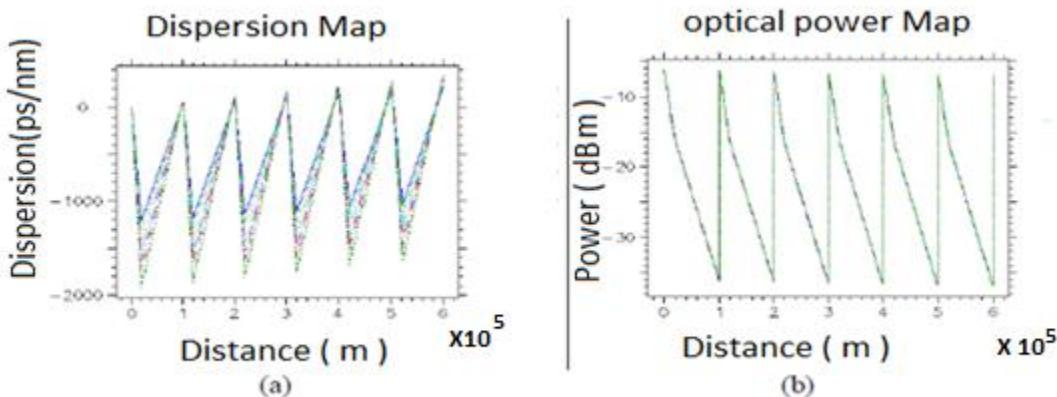
الشكل ٤ .٤ L ( SMF ) = 40Km , L ( DCF ) = 20Km : a

$$L(\text{SMF}) = 60\text{Km}, L(\text{DCF}) = 20\text{Km} : b$$

$$L(\text{SMF}) = 80\text{Km}, L(\text{DCF}) = 20\text{Km} : c$$

نجد أن العملية المثالية هي اختيار DCF بطول 20Km و SMF بطول 80Km .

يبين الشكل التالي خريطة التشتت و خريطة القدرة الضوئية [ ٢٥ ].

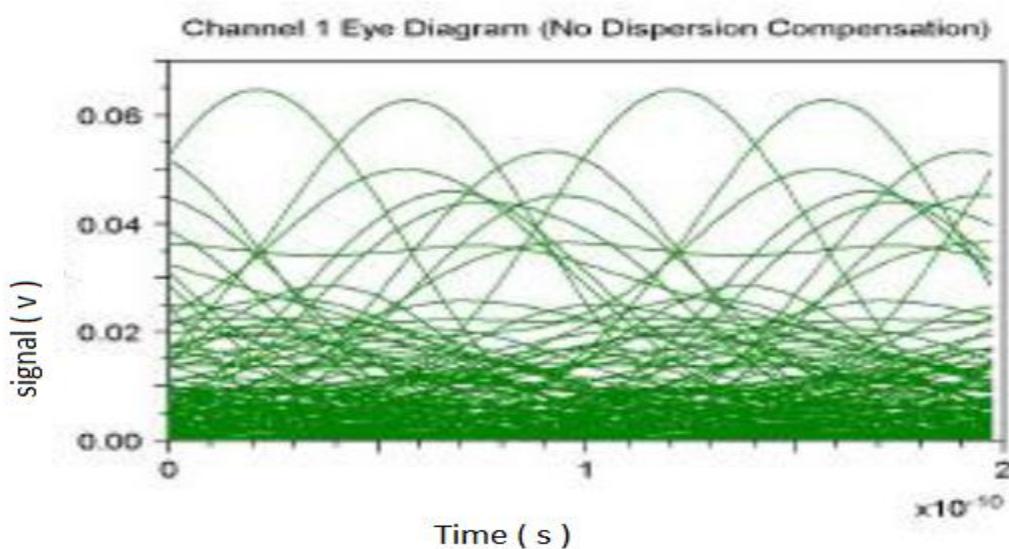


الشكل ٤.٥ : a : خريطة التشتت

b : خريطة القدرة الضوئية

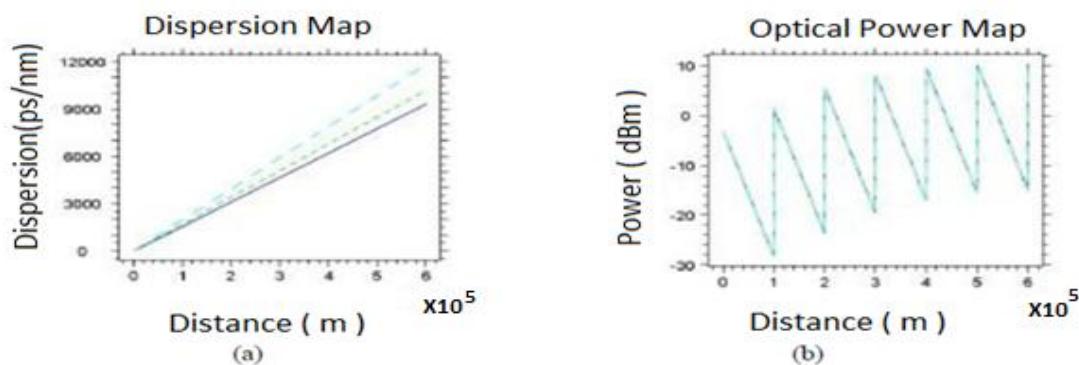
تظهر خريطة القدرة أن القدرة تتحفظ بشكل حاد أكثر في مقطع DCF منه في مقطع SMF لأن التشتت في DCF أكبر منه في SMF .

يبين الشكل التالي أداء نظام لم نطبق فيه تعويض التشتت حيث طول الليف SMF هو 0Km و DCF بطول 100Km .



الشكل ٤.٦ : مخطط فتحة العين للإشارة بدون تعويض التشتت

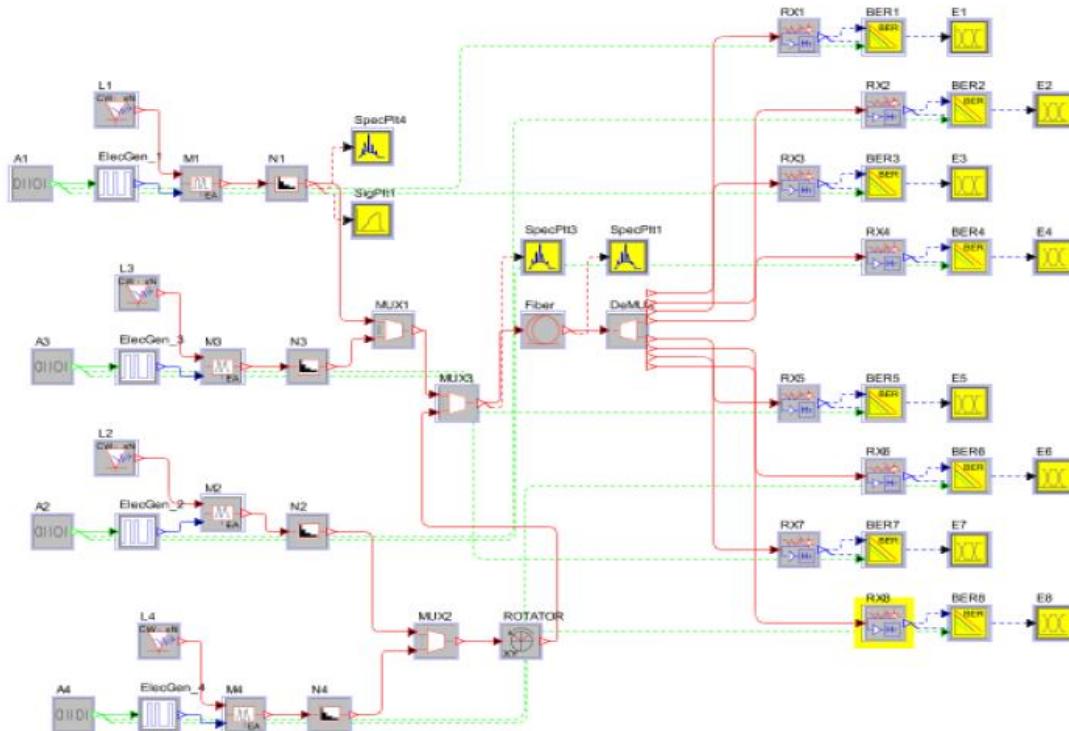
نجد أن خريطة القدرة ترتفع مع طول الليف لأن المضخم يعوض التخادم عند كل وصلة و بما أنه لا يوجد تعويض للتشتت فإن التشتت سيتراكم و ينتج فتحة عين مغلقة .



الشكل ٧.٤ : a : خريطة التشتت بدون تعويض التشتت  
b : خريطة القدرة الضوئية بدون تعويض التشتت

## ٤-٢- دراسة ومحاكاة آثار الاستقطاب في أنظمة WDM:

لدينا نظام WDM مؤلف من ٨ قنوات و نريد دراسة أثر تغيير كل من طول الليف و زوايا استقطاب القنوات على أدائه ، و الشكل التالي يبين هذا النظام [ ٢٤ ]

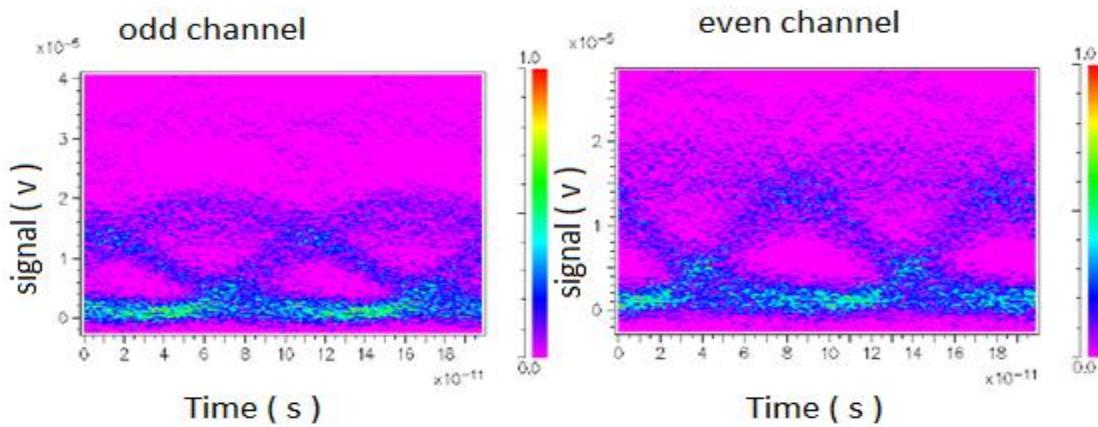


الشكل ٤.٨. محاكاة نظام WDM مؤلف من ٨ قنوات

في هذا التطبيق يتم استخدام ليزر مستمر كحامل للإشارة و يوجد ثمانية قنوات بينها فوائل 50GHz و تبدأ بطول الموجة 1537.4nm ، إن مصدر المعلومات يستخدم لتوليد تبالي برات عشوائي عند معدل 10Gbps . تقوم الإشارة الضوئية بتعديل معلومات الدخل و نوع الترميز المستخدم NRZ. يتم جمع القنوات الفردية المعدلة بواسطة مجمع MUX و يتم جمع القنوات الزوجية المعدلة بمجمع آخر و إرسالها إلى مدور استقطاب ثم يتم جمع القنوات كلها بواسطة مجمع و إرسالها عبر ليف مع تغيير طوله 85,80,75Km مع تفعيل التخادم و التشتت و الآثار اللاخطية . عند الاستقبال يتم فك تجميع القنوات و إرسالها إلى ٨ كواشف

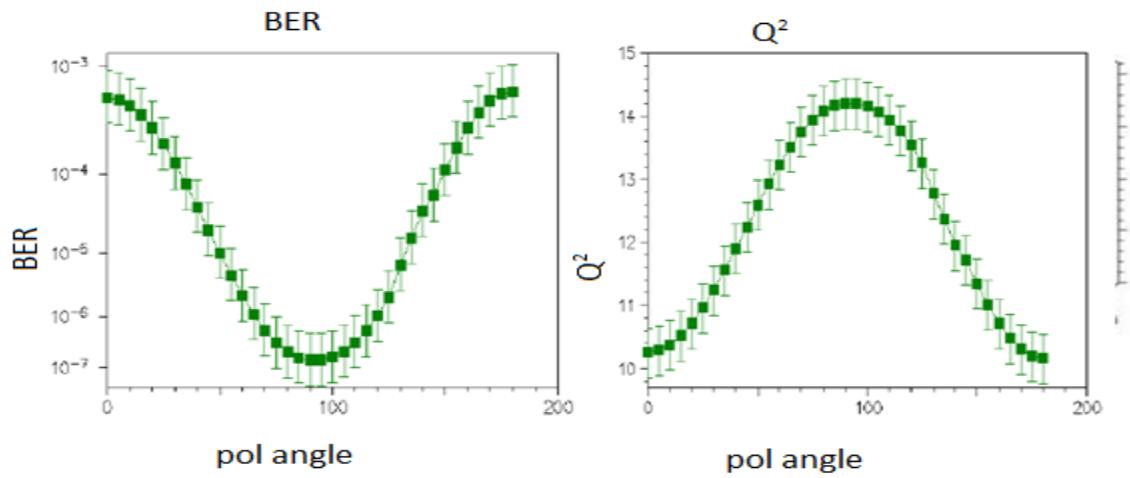
متبوعة بمقاييس BER لقياس أداء النظام حيث ستتم معرفة قيمة BER, معامل الجودة (Q-Factor) ، مخطط العين eye diagram و طيف الدخل الضوئي للقوى الفردية والزوجية. يتم قياس أطيف الأطوال الموجية للدخل و الخرج بواسطة مقياس ضوئي (Optical Scope) و يتم قياس BER و عامل الجودة عند خرج المستقبل باستخدام مقياس BER (BER Tester) و نرى مخطط العين بواسطة محلل مخطط العين (Eye Diagram Analyzer).

سندرس قناة فردية و أخرى زوجية من أجل أطوال ليف مختلفة و استقطاب عشوائي و الشكل التالي يبين مخطط العين لقناتين زوجية و فردية : [٢٤]



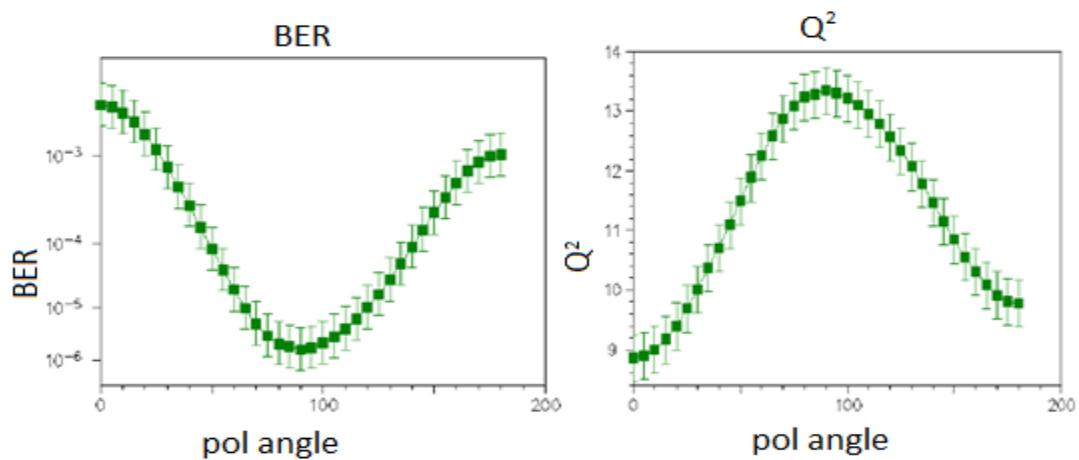
الشكل ٩.٤ : مخطط العين لقناة فردية و أخرى زوجية

نلاحظ أن فتحة العين أفضل في القناة الفردية منها في الزوجية . بداية سنأخذ طول الليف 75Km و سيتم مسح زاوية الاستقطاب من ٠ إلى ١٨٠ درجة بخطوة ٥ درجات و يتم قياس عامل الجودة مع زاوية الاستقطاب و الشكل التالي يبين النتيجة لقناة فردية



الشكل ٤ . ١٠ : معاملی BER و Q-factor مع زاوية الاستقطاب لقناة فردية ( ١ )

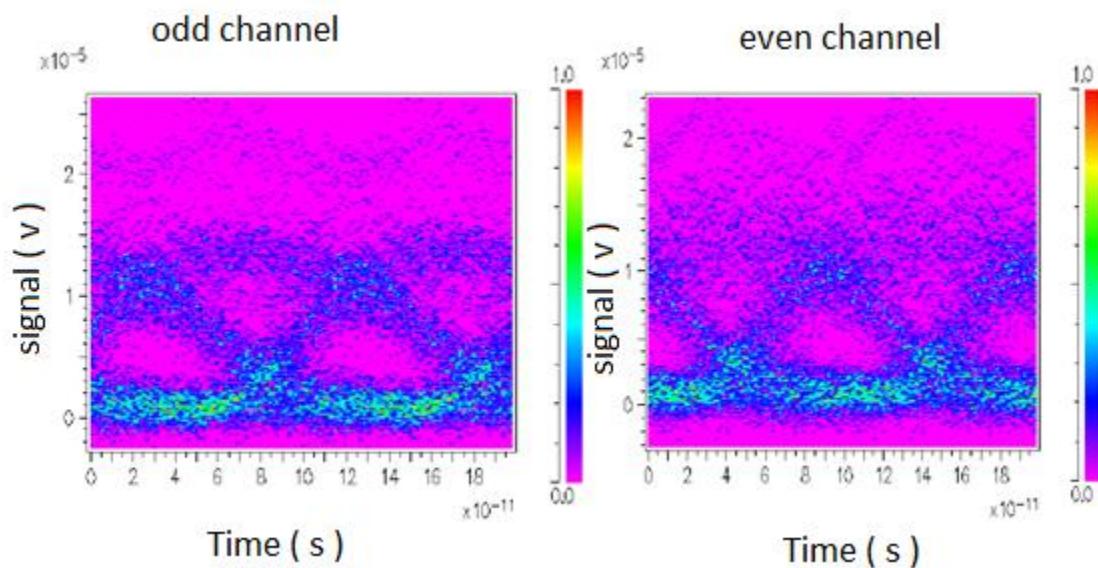
الشكل التالي يبين النتيجة لقناة زوجية



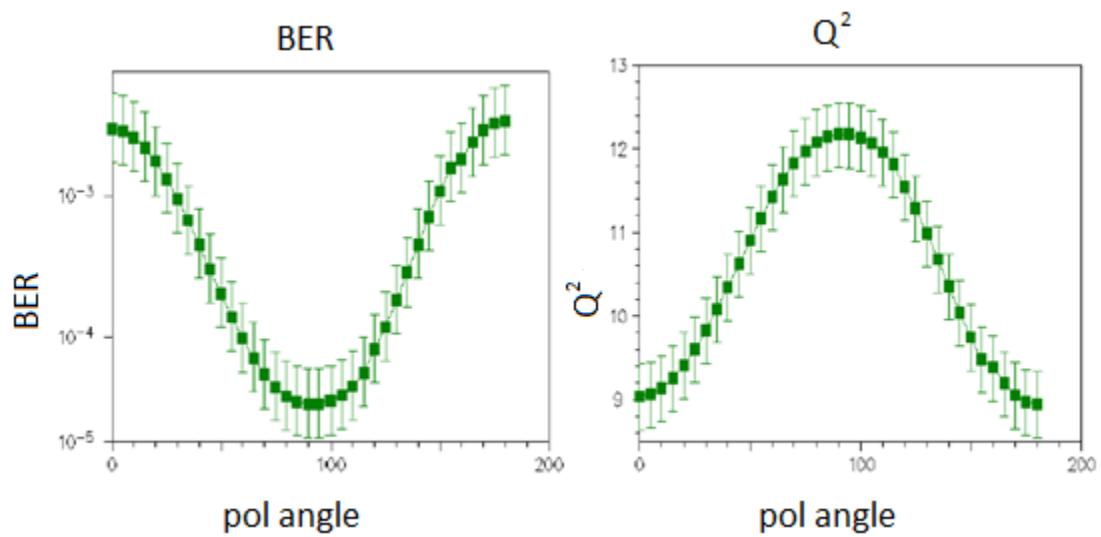
الشكل ٤ . ١١ : معاملی BER و Q-factor مع زاوية الاستقطاب لقناة زوجية ( ٢ )

مع تغير زاوية الاستقطاب من  $0^\circ$  -  $90^\circ$  درجة تتنفس قيمة BER و تزداد قيمة Q-Factor و عند  $90^\circ$  درجة تكون قيمة BER أصغرية و قيمة Q-Factor أعظمية و إذا زادت قيمة زاوية الاستقطاب فإن BER سيبدأ بالتزاييد و قيمة Q-Factor ستبدأ بالتناقص أما عند زاوية الاستقطاب  $0^\circ$  و  $180^\circ$  درجة تكون قيمة BER أصغرية و قيمة Q-Factor أعظمية و من الملاحظ أن قيمة Q-Factor أكبر في حالة القناة الفردية منها في القناة الزوجية عند زاوية استقطاب صفرية .

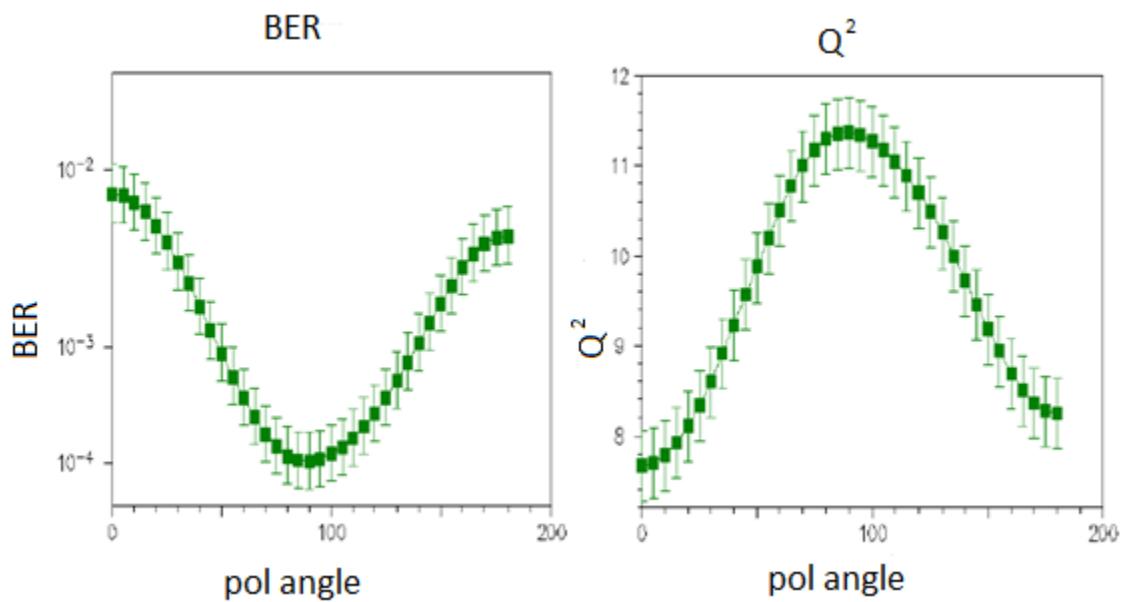
بإعادة نفس العملية السابقة و لكن من أجل طول ليف  $80\text{Km}$  نجد أنه بزيادة طول الليف ستزداد قيمة BER و تتنفس قيمة Q-Factor و ستتناقص فتحة العين [ ٢٤ ] .



الشكل ١٢.٤ : مخطط العين لقناة فردية و أخرى زوجية

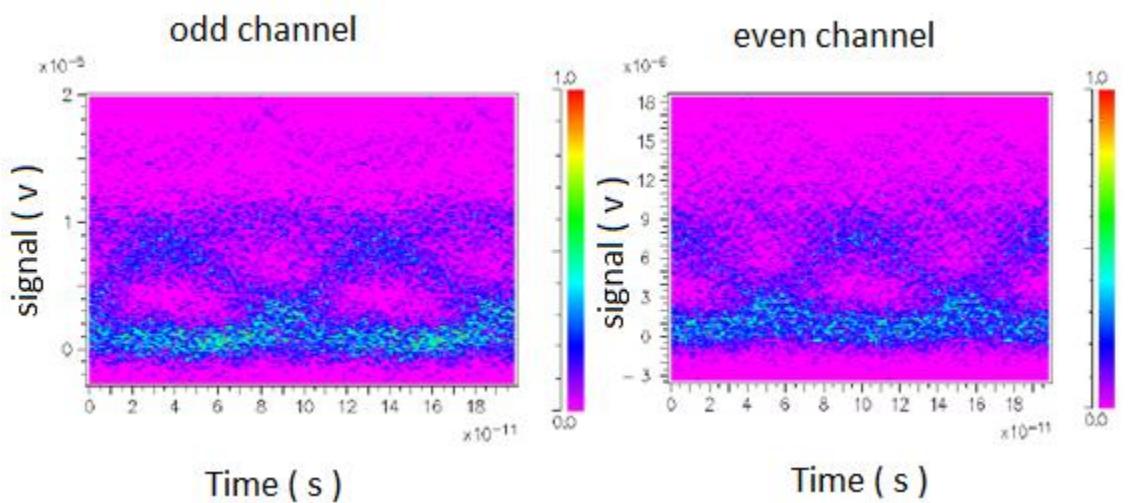


الشكل ٤.٤ : معاملی BER و Q-factor مع زاوية الاستقطاب لقناة فردية (١)

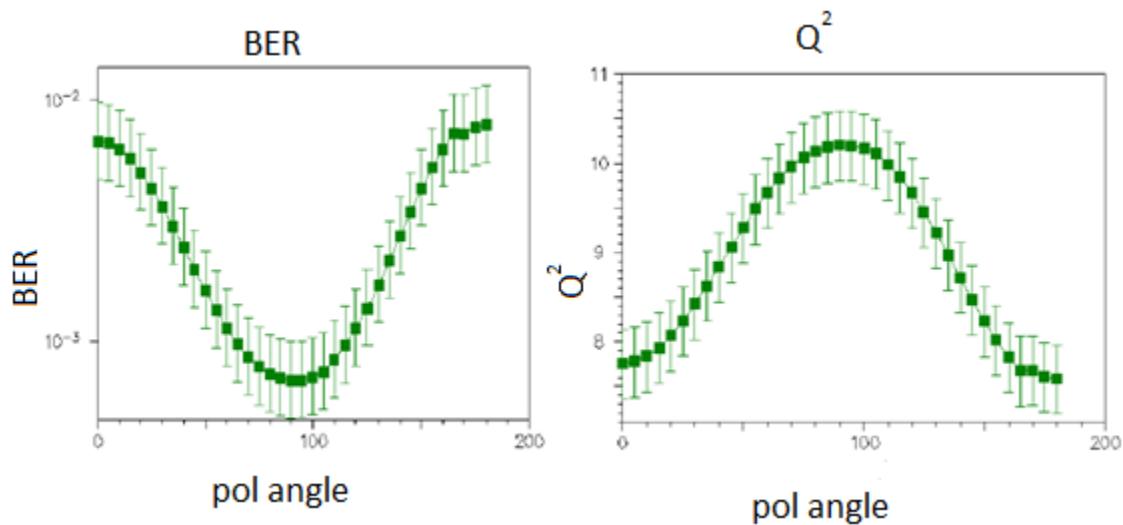


الشكل ٤.٤ : معاملی BER و Q-factor مع زاوية الاستقطاب لقناة زوجية (٢)

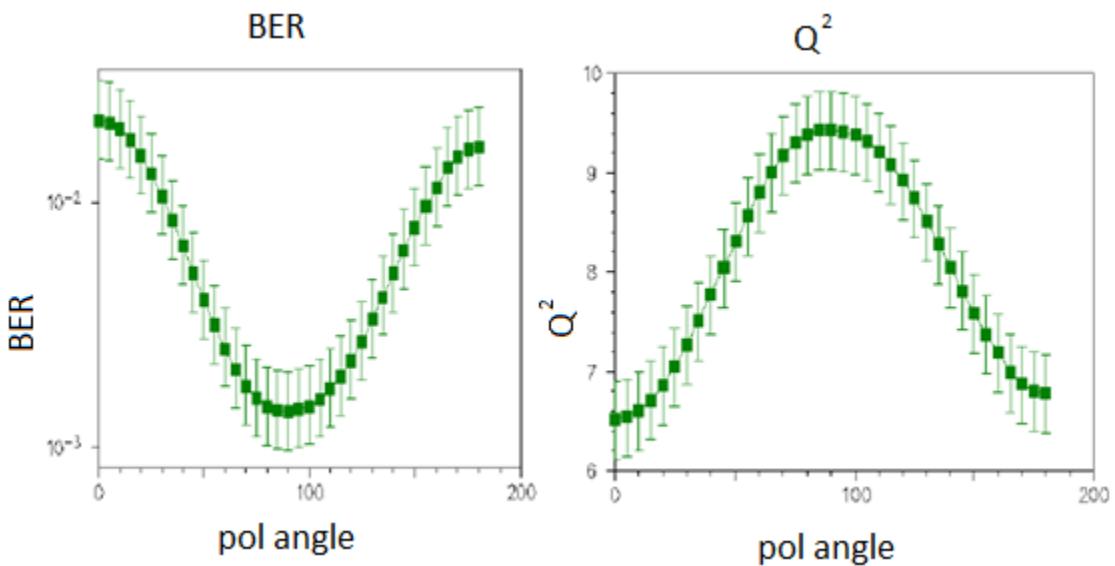
بإعادة نفس العملية من أجل ليف بطول 85Km نلاحظ أيضاً نفس النتيجة : بزيادة طول الليف زاد BER و نقص Q-Factor و تناقصت فتحة العين [ ٢٤ ]



الشكل ٤ . ١٥ : مخطط العين لقناة فردية و أخرى زوجية

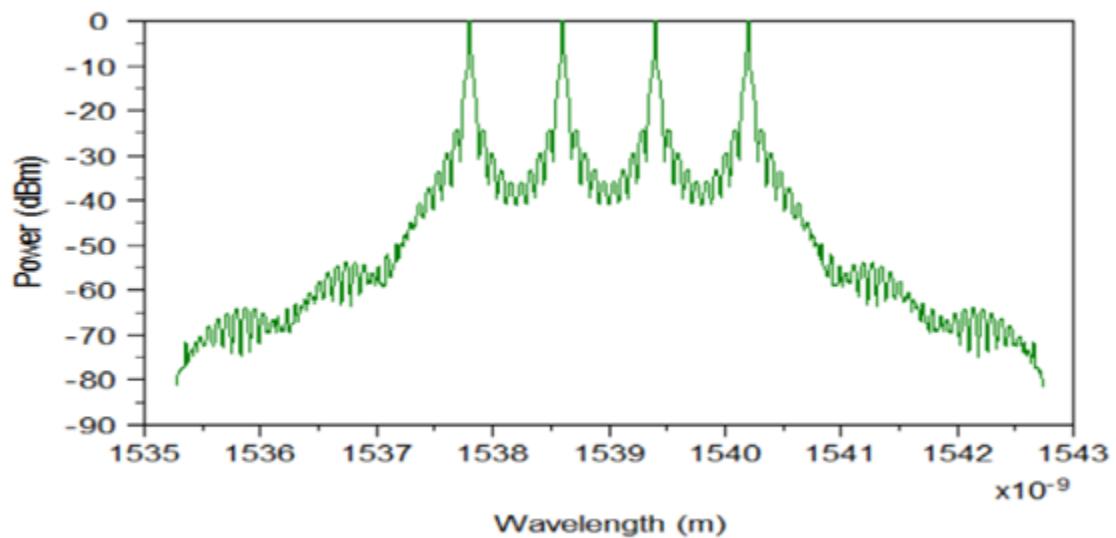


الشكل ٤ . ١٦ : معاملی BER و Q-factor مع زاوية الاستقطاب لقناة فردية ( ١ )

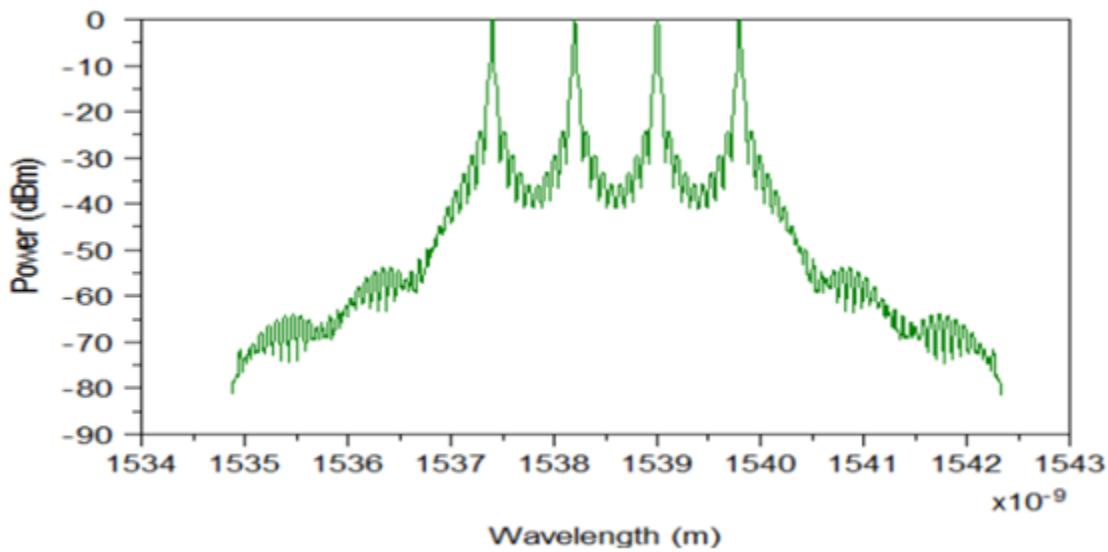


الشكل ٤.١٧ : معاملي BER و  $Q$ -factor مع زاوية الاستقطاب لقناة زوجية ( ٢ )

بأخذ قياسات القدرة للأطوال الموجية في القنوات الفردية و الزوجية نجد أن القدرة الأعظمية توجد عند مراكز الأطوال الموجية المدروسة و نلاحظ المنحنيات التالية :



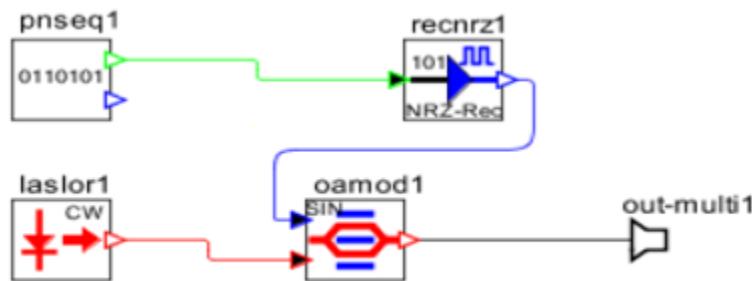
الشكل ٤.١٨ : طيف طول الموجة لقناة فردية



الشكل ١٩.٤ : طيف طول الموجة لقناة زوجية

#### ٤-٣- دراسة ومحاكاة أداء نظام DWDM بتغيير البعد بين القنوات :

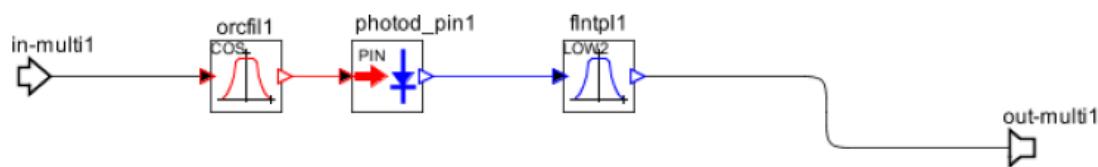
لدينا نظام اتصالات ضوئي مؤلف من مرسل ، قناة اتصال و مستقبل  
عند الإرسال يستخدم ليزر مستمر لتوليد حامل للإشارة و الذي يقوم بتعديل إشارة الدخل. أما  
مصدر البيانات فيستخدم لتوليد إشارة دخل عشوائية عند معدل ب Bates 10Gbps ثم يتم جمع  
كل إشارات الدخل بواسطة مجمع MUX و بعدها تضخّم بواسطة مكبر Booster ثم ترسل  
على طول الليف كما هو مبين بالشكل التالي :



الشكل ٢٠.٤ : المرسل في نظام الاتصالات الضوئي

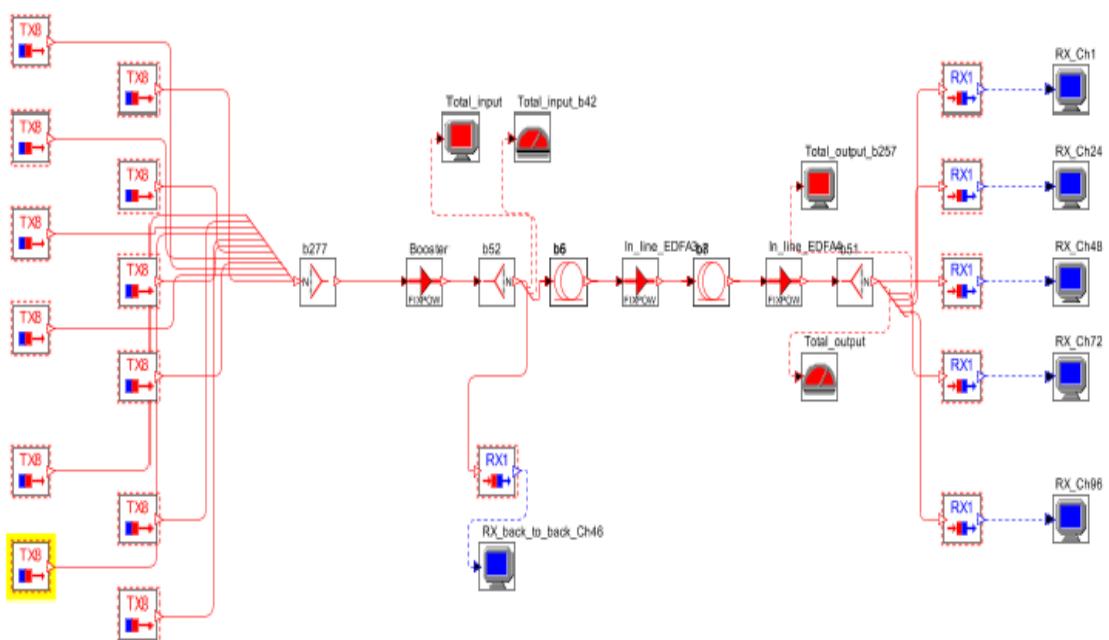
يتم وضع مكبر EDFA بعد خمسين متراً لتعويض الفقد و يعتبر التشتت من أهم العوامل التي تحد من سرعة الإرسال و قيمة التشتت عند نافذة 1550nm هي  $17\text{ps}/(\text{nm.Km})$  لذا يجب استخدام DCF لتعويض التشتت.

عند الاستقبال يتم تفكيك الإشارات عن بعضها بواسطة De-MUX و يتم تحويل الإشارة الضوئية إلى كهربائية بواسطة كاشف كهرضوئي photodiode ثم تمر الإشارة بمرشح Bessel Filter وهو عبارة عن مرشح تمrir منخفض و سيتم وصل مقياس ضوئي للخرج لفحص الإشارة و هذا ما يبينه الشكل التالي :



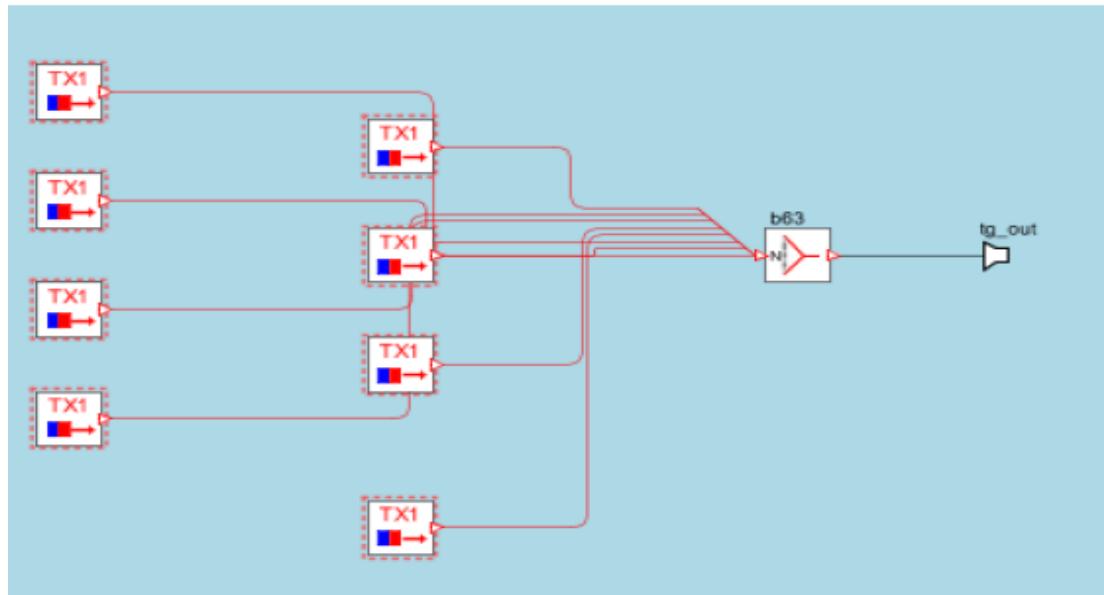
الشكل ٢١.٤ : المستقبل في نظام الاتصالات الضوئي

لدينا ٩٦ مستخدم بأطوال موجية مختلفة تفصل فيما بينها مسافات معينة و الشكل التالي يبين ذلك [ ٢٤ ] :



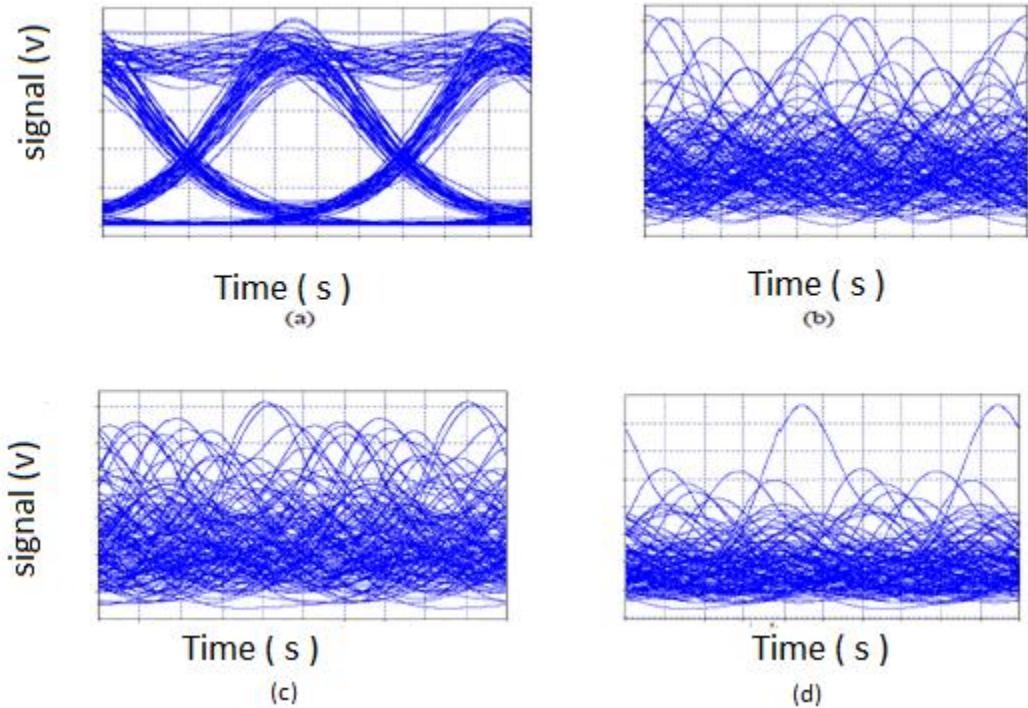
الشكل ٢٢.٤ : نظام اتصالات مؤلف من ٩٦ قناة

في الرسم الصندوق TX8 عبارة عن 8 قنوات إرسال . و هو موضح بالشكل التالي



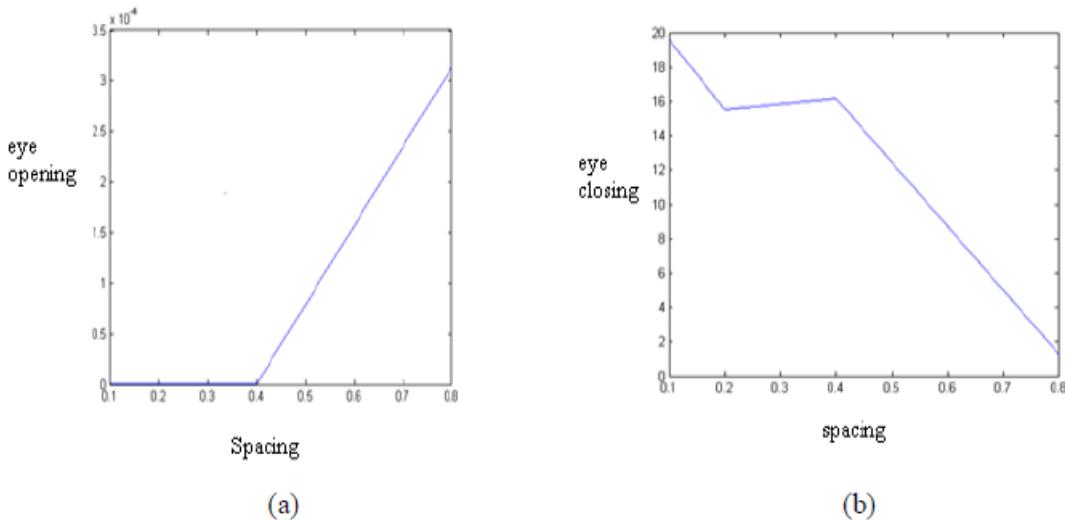
الشكل ٢٣.٤ : صندوق الإرسال لـ ٨ قنوات

و كذلك الأمر بالنسبة لـ RX8 و هو عبارة عن ٨ قنوات استقبال .  
بتغيير المسافة الفاصلة بين القنوات و إجراء القياسات نجد أنه كلما أنقصنا هذه المسافة فإن  
فتحة العين ستتناقص كما هو مبين بالشكل التالي :



الشكل ٤ : a : مخطط العين بفواصل  $0.8\text{nm}$  بين القنوات  
 b : مخطط العين بفواصل  $0.4\text{nm}$  بين القنوات  
 c : مخطط العين بفواصل  $0.2\text{nm}$  بين القنوات  
 d : مخطط العين بفواصل  $0.1\text{nm}$  بين القنوات

الشكل التالي يبين أثر انماض المسافة بين القنوات على فتحة العين و إغلاقها حيث أنه بزيادة المسافة بين القنوات تزداد فتحة العين و بإنماض المسافة يزداد إغلاق فتحة العين .



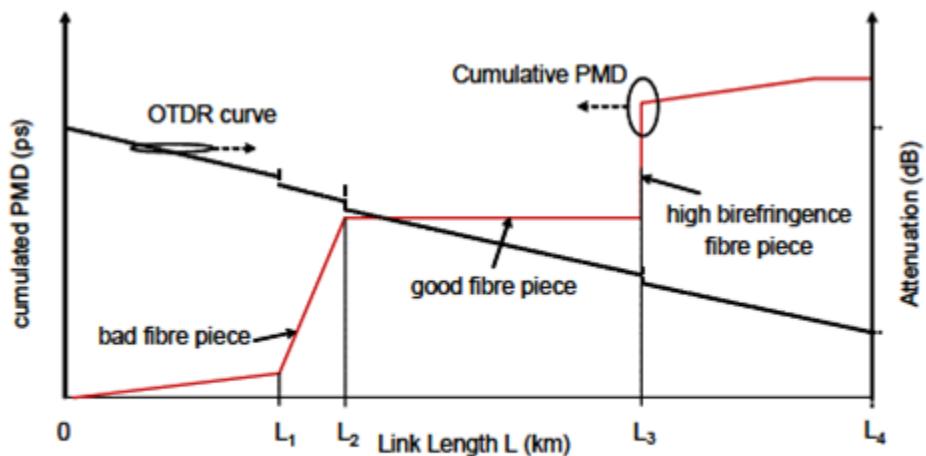
الشكل ٤ .٤ : a : مخطط فتح فتحة العين مع البعد بين القنوات

b : مخطط إغلاق فتحة العين مع البعد بين القنوات

#### ٤-٤- دراسة تخفيف أثر PMD على طول الليف :

تتألف وصلات الألياف الضوئية في شبكات الاتصالات من عدة مقاطع موصلة مع بعضها البعض بواسطة موصلات connectors و تكون ذات أطوال نموذجية من عدة عشرات من الكيلومترات. و قيمة PMD تختلف من مقطع لآخر في الليف لذا عندما نريد إرسال 40Gbps نقوم بدراسة قيم PMD على طول الليف كاملاً فيظهر لدينا مقاطع ذات عامل PMD أكبر بكثير من مقاطع أخرى و وبالتالي باستبدالها يمكن حل المشكلة. في البدايات عندما تم استخدام ليف وحيد النمط كان التخادم و التشتيت اللوني من أهم العوامل المحددة لمعدل الإرسال و طول الإرسال لكن بتطور المضخمات الضوئية و تقنيات تعويض التشتيت اللوني زادت فعالية أنظمة الاتصالات من حيث السعة و المسافة و لكن من أجل إرسال 40Gbps بقيت مشكلة PMD عائقاً في الشبكات الممدودة سابقاً و هي ناتجة عن سببين داخلي و خارجي . السبب الداخلي ناتج عن عملية تصنيع الليف من حيث اللامثالية في تدوير الليف و الشوائب ضمنه و السبب الخارجي ناتج عن عملية الضغط على الكابلات أثناء و بعد دفنها في التراب.

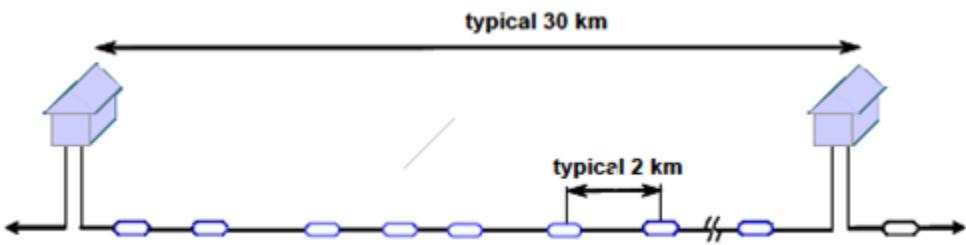
لحل هذه المشكلة يتم استخدام معوض تشتت لكل قناة أو استبدال مقطع الليف بأخر و الحل الأخير هو أكثر اقتصادية و هذا ما يبينه المثال التالي حيث أن الشكل التالي يبين توزع PMD على وصلة ليف ضوئي .



الشكل ٤ : منحني PMD

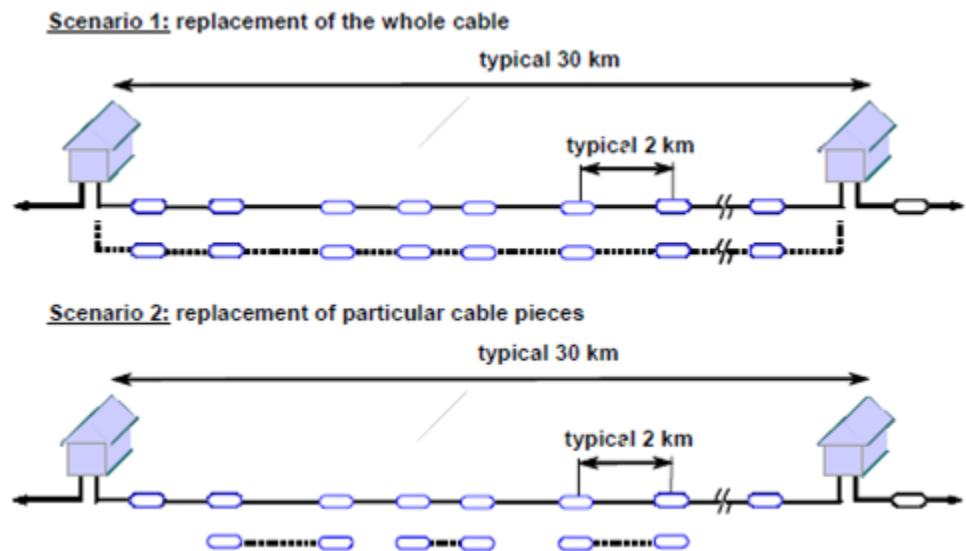
يوجد قطعتين من الليف لهما قيمة PMD عالية واحدة بين  $L_1$  و  $L_2$  و هي سيئة و الأخرى عند  $L_3$  و هي قصيرة لكن تعاني من انكسار مضاعف حاد birefringence أما بقية قطع الليف فهي ذات قيم PMD مقبولة و وبالتالي باستبدال القطعتين فقط تكون قد أوجدنا حلًا اقتصاديًّا.

في التطبيق التالي سنجري اختباراً على وصلة من شبكة واقعية بطول 30Km بين محطتين و هذه الوصلة مؤلفة من قطع صغيرة بطول 2Km موصولة مع بعضها كما هو مبين بالشكل



الشكل ٤ . ٢٧ : مقطع في الكابل

و قد تم قياس قيم PMD بواسطة مقياس EXFO FTB 5500 وكانت القيم بين 4.8-16.6 ps و هي أكثر من 8ps و بالتالي فالوصلة غير مناسبة لإرسال 40Gbit/s الشكل التالي يبين خيارين محتملين لتطوير الكابل

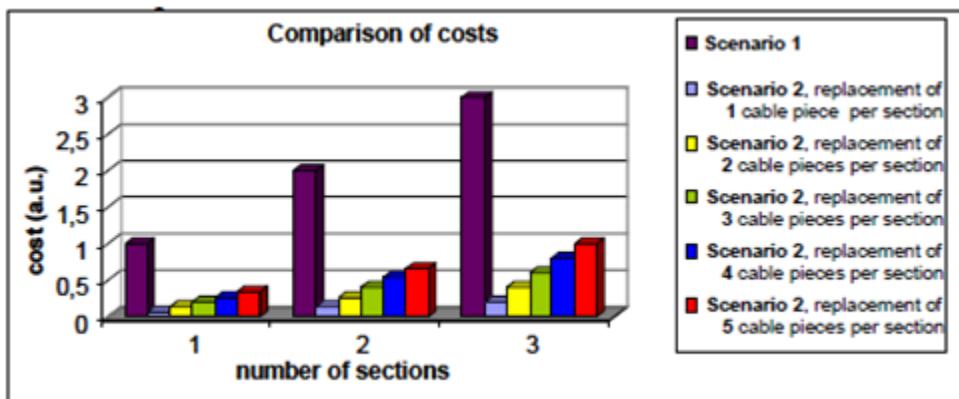


الشكل ٤ . ٢٨ : الخيارين المطروхиin لاستبدال الكابل

الخيار الأول لتخفييف PMD هو قياس قيمته الكلية على كامل مقطع الليف و يتم تصنیف الليف على أساس مناسب و غير مناسب لمعدل الإرسال حسب قيمة PMD و بالتالي المناسب يتم استخدامه و الغير مناسب يتم استبداله.

الخيار الثاني هو قياس قيمة PMD على كل قطعة من قطع الوصلة و استبدال القطع الصغيرة الغير مناسبة فقط عوضاً عن تغيير الكابل كله .

الشكل التالي يبين مقارنة الكلفة بين الخيارين :



الشكل ٢٩.٤ : مقارنة الكلفة بين الخيارين

في الخيار الأول يجب استبدال كامل المقطع و الكلفة الكلية لا تكون ثمن الكابل فحسب و إنما ثمن الوصلات و الحفر و غير ذلك أما في الخيار الثاني إذا وجد ٥ قطع سيئة سيتم تغييرهم فقط و هذه الكلفة تمثل ٤٠ % من كلفة تغيير المقطع كاملاً و إذا وجد عدد أقل من هذا فإن الخيار الثاني مفضل . فإذا كانت لدينا مقاطع من الألياف و كل مقطع مؤلف من عدد من الوصلات و في كل مقطع يوجد ٤ قطع سيئة فإن كلفة استبدال الأربع قطع في كل مقطع أقل من كلفة استبدال مقطع واحد بكامله .

في هذا الفصل تمت دراسة عدة أمثلة كمحاكاة تعويض التشتت و دراسة و محاكاة آثار الاستقطاب و دراسة و محاكاة أداء نظام DWDM بتغيير البعد بين القنوات و دراسة تخفيف أثر PMD على طول الليف أما في الفصل التالي سنبين الدراسة العملية للبحث بالتفصيل .

## الفصل الخامس : الدراسة العملية

سنبع في هذا الفصل مواصفات منظمة ITU-T القياسية لكل من كابل الليف الضوئي وحد النمط القياسي G.652 و كابل الليف الضوئي وحد النمط ذو التشتت المزاح G.653 و سنتحدث عن وسائل قياس PMD و إجرائية قياسه باستخدام جهاز EXFO FTP-5500 ثم سنستعرض نتائج قياس PMD و نناقشه.

### ٤-١-٥ - مواصفات منظمة ITU-T القياسية لأنواع كابل الليف الضوئي :

#### ٤-١-٥ - مواصفات الليف وحد النمط القياسي G.652 : [٢٨]

يصنف اتحاد الاتصالات العالمي ITU-T مواصفات الليف الهندسية و الميكانيكية للليف G.652 و الذي يملك تشتت صفرى عند الطول الموجي 1310nm كما أنه يمكن أن يعمل عند الطول الموجي 1550nm .

الجدوال التالى تبين مواصفات عدة أنماط من الليف G.652 :

Fibre attributes		
Attribute	Detail	Value
Mode field diameter	Wavelength	1310 nm
	Range of nominal values	8.6-9.5 $\mu\text{m}$
	Tolerance	$\pm 0.6 \mu\text{m}$
Cladding diameter	Nominal	125.0 $\mu\text{m}$
	Tolerance	$\pm 1 \mu\text{m}$
Core concentricity error	Maximum	0.6 $\mu\text{m}$
Cladding noncircularity	Maximum	1.0%
Cable cut-off wavelength	Maximum	1260 nm
Macrobend loss	Radius	30 mm
	Number of turns	100
	Maximum at 1550 nm	0.1 dB
Proof stress	Minimum	0.69 GPa
Chromatic dispersion coefficient	$\lambda_{0\min}$	1300 nm

	$\lambda_{0\max}$	1324 nm
	$S_{0\max}$	0.092 ps/nm <sup>2</sup> × km
<b>Cable attributes</b>		
Attribute	Detail	Value
Attenuation coefficient	Maximum at 1310 nm	0.5 dB/km
	Maximum at 1550 nm	0.4 dB/km
PMD coefficient	M	20 cables
	Q	0.01%
	Maximum PMDQ	0.5 ps/ $\sqrt{km}$

الجدول ١.٥ : مواصفات الليف G.652.A

يدعم هذا الليف معدل إرسال يصل إلى STM-16 .

<b>Fibre attributes</b>		
Attribute	Detail	Value
Mode field diameter	Wavelength	1310 nm
	Range of nominal values	8.6-9.5 $\mu$ m
	Tolerance	$\pm 0.6 \mu$ m
Cladding diameter	Nominal	125.0 $\mu$ m
	Tolerance	$\pm 1 \mu$ m
Core concentricity error	Maximum	0.6 $\mu$ m
Cladding noncircularity	Maximum	1.0%
Cable cut-off wavelength	Maximum	1260 nm
Macrobend loss	Radius	30 mm
	Number of turns	100
	Maximum at 1625 nm	0.1 Db
Proof stress	Minimum	0.69 GPa
Chromatic dispersion coefficient	$\lambda_{0\min}$	1300 nm
	$\lambda_{0\max}$	1324 nm
	$S_{0\max}$	0.092 ps/nm <sup>2</sup> × km
<b>Cable attributes</b>		
Attribute	Detail	Value
Attenuation coefficient	Maximum at 1310 nm	0.4 dB/km
	Maximum at 1550 nm	0.35 dB/km
	Maximum at 1625 nm	0.4 dB/km
PMD coefficient	M	20 cables

	Q	0.01%
	Maximum PMDQ	0.20 ps/ $\sqrt{km}$

## الجدول ٢.٥ : مواصفات الليف G.652.B

يدعم هذا الليف معدل إرسال أعلى يصل إلى STM 64 .

Fibre attributes		
Attribute	Detail	Value
Mode field diameter	Wavelength	1310 nm
	Range of nominal values	8.6-9.5 $\mu m$
	Tolerance	$\pm 0.6 \mu m$
Cladding diameter	Nominal	125.0 $\mu m$
	Tolerance	$\pm 1 \mu m$
Core concentricity error	Maximum	0.6 $\mu m$
Cladding noncircularity	Maximum	1.0%
Cable cut-off wavelength	Maximum	1260 nm
Macrobend loss	Radius	30 mm
	Number of turns	100
	Maximum at 1625 nm	0.1 dB
Proof stress	Minimum	0.69 GPa
Chromatic dispersion coefficient	$\lambda_{0\min}$	1300 nm
	$\lambda_{0\max}$	1324 nm
	$S_{0\max}$	0.092 ps/nm <sup>2</sup> $\times km$
Cable attributes		
Attribute	Detail	Value
Attenuation coefficient	Maximum from 1310 nm to 1625 nm	0.4 dB/km
	Maximum at 1383 nm $\pm 3$ nm	0.4 dB/km
	Maximum at 1550 nm	0.3 dB/km
PMD coefficient	M	20 cables
	Q	0.01%
	Maximum PMDQ	0.20 ps/ $\sqrt{km}$

## الجدول ٣.٥ : مواصفات الليف G.652.C

إن الليف G.652.C مشابه لليف G.652.A مع إمكانية التوسيع بالطول الموجي في المجال

1360nm - 1530nm

Fibre attributes		
Attribute	Detail	Value
Mode field diameter	Wavelength	1310 nm
	Range of nominal values	8.6-9.5 $\mu\text{m}$
	Tolerance	$\pm 0.6 \mu\text{m}$
Cladding diameter	Nominal	125.0 $\mu\text{m}$
	Tolerance	$\pm 1 \mu\text{m}$
Core concentricity error	Maximum	0.6 $\mu\text{m}$
Cladding noncircularity	Maximum	1.0%
Cable cut-off wavelength	Maximum	1260 nm
Macrobend loss	Radius	30 mm
	Number of turns	100
	Maximum at 1625 nm	0.1 dB
Proof stress	Minimum	0.69 GPa
Chromatic dispersion coefficient	$\lambda_{0\min}$	1300 nm
	$\lambda_{0\max}$	1324 nm
	$S_{0\max}$	0.092 ps/nm <sup>2</sup> $\times$ km
Cable attributes		
Attribute	Detail	Value
Attenuation coefficient	Maximum from 1310 nm to 1625 nm	0.4 dB/km
	Maximum at 1383 nm $\pm 3$ nm	0.4 dB/km
	Maximum at 1550 nm	0.3 dB/km
PMD coefficient	M	20 cables
	Q	0.01%
	Maximum PMDQ	0.20 ps/ $\sqrt{\text{km}}$

#### الجدول ٤.٥ : مواصفات الليف G.652.D

إن الليف G.652.D مشابه لليف G.652.B مع إمكانية التوسيع بالطول الموجي في المجال

. 1360nm - 1530nm

الجدول التالي يبين قيم التخادم و التشتت اللوني لوصلة ليف G.652 :

Attenuation coefficient	Wavelength region	Typical link value
	1260 nm-1360 nm	0.5 dB/km
	1530 nm-1565 nm	0.275 dB/km

	1565 nm-1625 nm	0.35 dB/km
Chromatic dispersion coefficient	D1550	17 ps/nm × km
	S1550	0.056 ps/nm <sup>2</sup> × km

الجدول ٥.٥ : قيم التخادم و التشتت اللوني لوصلة ليف G.652

الجدول التالي يبين قيم تشست النمط الاستقطابي لوصلة ليف G.652 :

Maximum PMDQ [ps/ $\sqrt{Km}$ ]	Link length [km]	Implied fibre induced maximum DGD [ps]	Channel bit rates
No specification			Up to 2.5 Gbit/s
0.5	400	25.0	10 Gbit/s
	40	19.0	10 Gbit/s
	2	7.5	40 Gbit/s
0.20	3000	19.0	10 Gbit/s
	80	7.0	40 Gbit/s
0.10	>4000	12.0	10 Gbit/s
	400	5.0	40 Gbit/s

الجدول ٦.٥ : قيم تشست النمط الاستقطابي لوصلة ليف G.652

٢-١-٥ - مواصفات الليف وحيد النمط ذو التشتت المزاح [٢٧] : G.653

يصنف اتحاد الاتصالات العالمي ITU-T مواصفات هذا الليف الذي يملك تشست صفرى عند طول الموجة 1550nm و يمكن أن يعمل عند الطول الموجي 1310nm و من الممكن استخدام هذا الليف عندما يكون لدينا CWDM أي عدد قليل من الأطوال الموجية المراد إرسالها معاً في المجال 1460nm - 1625nm .

بيان الجدولان التاليان مواصفات نمطين من الليف : G.653

Fibre attributes		
Attribute	Detail	Value
Mode field diameter	Wavelength	1550 nm
	Range of nominal values	7.8 – 8.5 $\mu\text{m}$
	Tolerance	$\pm 0.8 \mu\text{m}$
Cladding diameter	Nominal	125.0 $\mu\text{m}$
	Tolerance	$\pm 1 \mu\text{m}$
Core concentricity error	Maximum	0.8 $\mu\text{m}$
Cladding non-circularity	Maximum	2.0%
Cable cut-off wavelength	Maximum	1270 nm
Macrobend loss	Radius	30 mm
	Number of turns	100
	Maximum at 1550 nm	0.5 dB
Proof stress	Minimum	0.69 GPa
Chromatic dispersion coefficient	$\lambda_{min}$	1525 nm
	$\lambda_{max}$	1575 nm
	$D_{max}$	3.5 ps/(nm $\times$ km)
	$\lambda_{0min}$	1500 nm
	$\lambda_{0max}$	1600 nm
	$S_{0max}$	0.085 ps/(nm <sup>2</sup> $\times$ km)
Uncabled fibre PMD coefficient	Maximum	
Cable attributes		
Attribute	Detail	Value
Attenuation coefficient	Maximum at 1550 nm	0.35 dB/km
PMD coefficient	M	20 cables
	Q	0.01%
	Maximum PMDQ	0.5 ps/ $\sqrt{\text{km}}$

الجدول ٧.٥ : مواصفات الليف G.653.A

Fibre attributes		
Attribute	Detail	Value
Mode field diameter	Wavelength	1550 nm

	Range of nominal values	7.8 – 8.5 $\mu\text{m}$
	Tolerance	$\pm 0.6 \mu\text{m}$
Cladding diameter	Nominal	125 $\mu\text{m}$
	Tolerance	$\pm 1 \mu\text{m}$
Core concentricity error	Maximum	0.6 $\mu\text{m}$
Cladding non-circularity	Maximum	1.0%
Cable cut-off wavelength	Maximum	1270 nm
Macrobend loss	Radius	30 mm
	Number of turns	100
	Maximum at 1550 nm	0.1 dB
Proof stress	Minimum	0.69 GPa
Chromatic dispersion coefficient (ps/nm $\times$ km)	$D_{min}(\lambda)$ : 1460-1525 nm	$0.085*(\lambda - 1525) - 3.5$
	$D_{min}(\lambda)$ : 1525-1625 nm	$3.5/75*(\lambda - 1600)$
	$D_{max}(\lambda)$ : 1460-1575 nm	$3.5/75*(\lambda - 1600)$
	$D_{max}(\lambda)$ : 1575-1625 nm	$0.085*(\lambda - 1575) + 3.5$
Uncabled fibre PMD coefficient	Maximum	
<b>Cable attributes</b>		
Attribute	Detail	Value
Attenuation coefficient	Maximum at 1550 nm	0.35 dB/km
PMD coefficient	M	20 cables
	Q	0.01%
	Maximum PMDQ	0.20 ps/ $\sqrt{\text{km}}$

الجدول ٨.٥ : مواصفات الليف G.653.B

إن الليف G.653.B مشابه لليف G.653.A لكن مع إمكانية دعم تقنية CWDM .

الجدول التالي يبين قيم التخادم و التشتت اللوني لوصلة ليف G.653 :

Attribute	Detail	Value
Attenuation coefficient	Wavelength	Typical link value
	1550 nm	0.275 dB/km
	1625 nm	TBD
Chromatic dispersion parameters	$\lambda_{0typ}$	1550 nm
	$S_{0typ}$	$0.07 \text{ ps}/(nm^2 \times \text{km})$

الجدول ٩.٥ : قيم التخادم و التشتت اللوني لوصلة ليف G.653

الجدول التالي يبين قيم تشتت النمط الاستقطابي لوصلة ليف G.653 :

Maximum PMDQ (ps/ $\sqrt{\text{km}}$ )	Link length (km)	Implied fibre induced maximum DGD (ps)	Channel bit rates
No specification			Up to 2.5 Gbit/s
0.5	400	25.0	10 Gbit/s
	40	19.0	10 Gbit/s
	2	7.5	40 Gbit/s
0.20	3000	19.0	10 Gbit/s
	80	7.0	40 Gbit/s
0.10	> 4000	12.0	10 Gbit/s
	400	5.0	40 Gbit/s

الجدول ١٠.٥ : قيم تشتت النمط الاستقطابي لوصلة ليف G.653

## ٢-٥ - وسائل قياس PMD :

### ١ - JMEA : Jones Matrix Eigen analysis

تعتمد هذه الطريقة على مصفوفة Jones و التي تحتوي على معلومات عن JMEA (Principal state of polarization) PSP , DGD , PMD تعدل المصدر الضوئي القابل للتوليف عند طرف الإرسال و تولد مجموعة من الأطوال الموجية ثم يتم القياس عند كل طول موجة و حساب DGD , PSP تبعاً لمصفوفة Jones

### ٢ - Inter Ferometric Method :

إن PMD هو متوسط DGD لكافة الأطوال الموجية في كافة حالات الاستقطاب . هذه الطريقة تستخدم مصدر ضوئي بحزمة عريضة يقوم بإرسال طولي موجة قريبتين جداً من بعضهما معاً و باستقطاب عشوائي ثم يتم حفظ التأخير بينهما و بإعادة القياسات عند أطوال موجية مختلفة و باستقطابات متعددة يتم الحصول على PMD . بكلمات أخرى هذه

الطريقة تقوم بقياس الاختلاف في الإرسال بين زوج عشوائي من الأطوال الموجية القريبة من بعضها و باستقطابات عشوائية .

٣ - المحلل الثابت Fixed Analyzer و معروف أيضاً بمسح الأطوال الموجية حيث يتم قياس معدل تغير الاستقطاب بتغيير طول الموجة وبالتالي يمكن معرفة DGD .

مقارنة بين الوسائل الثلاثة :

قامت عدة منظمات عالمية بعدة قياسات مخبرية أثبتت أن الاختلاف بين هذه الوسائل هو بين  $\pm 10\%$  و  $\pm 20\%$  حيث يوجد تطابق عالي بين طريقي JMEA و FA و اختلاف نسبي بين FA و INT و القياسات التالية لـ DGD لأنواع مختلفة من الألياف تبين الفرق

	Distance	INT	FA	Difference
New Fiber	100 Km	0.77 ps	0.85 ps	10%
Fiber > 2000	69 Km	0.282 ps	0.282 ps	1%
Fiber > 2000	89 Km	0.519 ps	0.479 ps	8%
Old Fiber < 1993	16 Km	7.2 ps	6.16 ps	16%
Old Fiber < 1993	32 Km	8.37 ps	7 ps	16%

الجدول ١١.٥ : مقارنة بين طريقي FA و INT

حسنات طرق القياس المختلفة :

- ١ - كل من FA و INT تأسسا في السوق .
- ٢ - مجال ديناميكي عالي : JME >FA , 45dB 50dB و INT حتى 47dB .
- ٣ - ارتياح جيد لكل أنواع القياس لكن يوجد خطأ منتظم في INT بسبب حذف القيمة المركزية .
- ٤ - مجال قياس DGD مناسب لجميع أنواع الألياف .
- ٥ - احتمالية القياس عبر عدة مكبرات EDFA ما عدا عند طريقة INT .
- ٦ - سرعة بالقياس تبدأ من 5s .
- ٧ - طريقة FA سهلة الاستعمال حيث لا يوجد إعدادات لبارمترات يجب إدخالها .
- ٨ - طريقة JMEA غير حساسة لاستقطاب إشارة الدخل و لا للتوصيل النمطي mode .
- ٩ - طريقة INT غير حساسة لاستقطاب إشارة الدخل عند وجود معير للاستقطاب .

سيئات طرق القياس المختلفة :

- ١ - في FA لا يتم قياس 2nd order PMD مباشرة و إنما يتم حسابه و يوجد حساسية لاستقطاب إشارة الدخل و قيمة PMD الأعظمية الممكن قياسها تصل إلى 60ps .
- ٢ - طريقة JMEA مكلفة في المجالات العملية و قيمة PMD الأعظمية الممكن قياسها تصل إلى 50ps .
- ٣ - في طريقة INT يجب إدخال القيمة الصحيحة لمجال DGD قبل بدء القياس و هنا أيضاً لا يتم قياس 2nd order PMD مباشرة و إنما يتم حسابه ويوجد حساسية لاستقطاب إشارة الدخل .

### ٣-٥- طريقة إجراء قياس PMD باستخدام المقياس EXFO FTP-5500

هذا المقياس يستخدم طريقة INT و يعطي قياسات دقيقة لـ PMD [ ٢٦ ]  
الشكل التالي يبين شكل هذا المقياس



الشكل ١.٥ : المقياس EXFO FTP- 5500

خصائص المقياس :

- ١ - محسن ضد الاهتزاز : و هي خاصية هامة عند فحص الكابلات عند مدها.
- ٢ - يعطي نتائج سريعة حيث تتم دورة القياس خلال 15sec .
- ٣ - ذو مجال ديناميكي عالي : حيث يصل إلى 40dB مما يعطي مسافة بعيدة لفحص الليف.
- ٤ - مجال قياس كبير حيث يستطيع هذا المقياس أن يتعامل مع قيم كبيرة لـ PMD تصل إلى 115ps.

إجرائية القياس :

١ - يتم وصل الجهاز بالكهرباء.

٢ - يتم تشغيل تطبيق تحليل PMD .

٣ - يتم وضع معاملات قياس PMD :

١) إدخال اسم الليف.

٢) إدخال معاملات التحصيل و هي :

A. طول الليف : ويجب أن تكون القيمة المدخلة 1m على الأقل.

B. طول الموجة : C,L Bands تغطي 1460nm-1675nm

1260nm-1675nm O,C,L Bands

وباختيار الثانية سيصبح الجهاز أبطأ في إظهار النتيجة.

C. مكان تخزين النتيجة : يوفر لنا الجهاز الإمكانيات التالية :

a. حفظ الملفات في الذاكرة : يسمح لك بتخزين مؤقت للنتائج في

الذاكرة لأهداف معالجة البيانات لكن هذه الطريقة تجعل الجهاز أبطأ

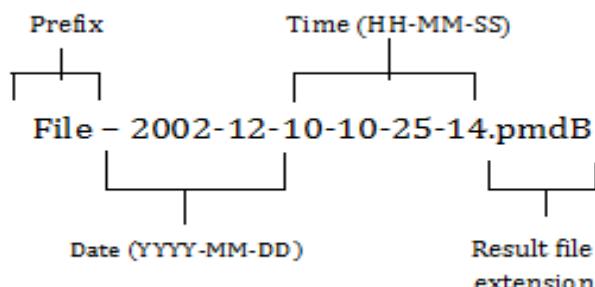
لذا قد تفضل تخزين النتائج أوتوماتيكياً و معالجتها فيما بعد.

b. الحفظ الأوتوماتيكي بعد القياس : عند اختيار هذا الخيار فإن التطبيق

سيحفظ نتائج التحصيل أوتوماتيكياً و بهذه الحالة نتجنب إشباع

الذاكرة.

c. الحفظ ضمن ملف خاص و يكون شكل الاسم كالتالي :



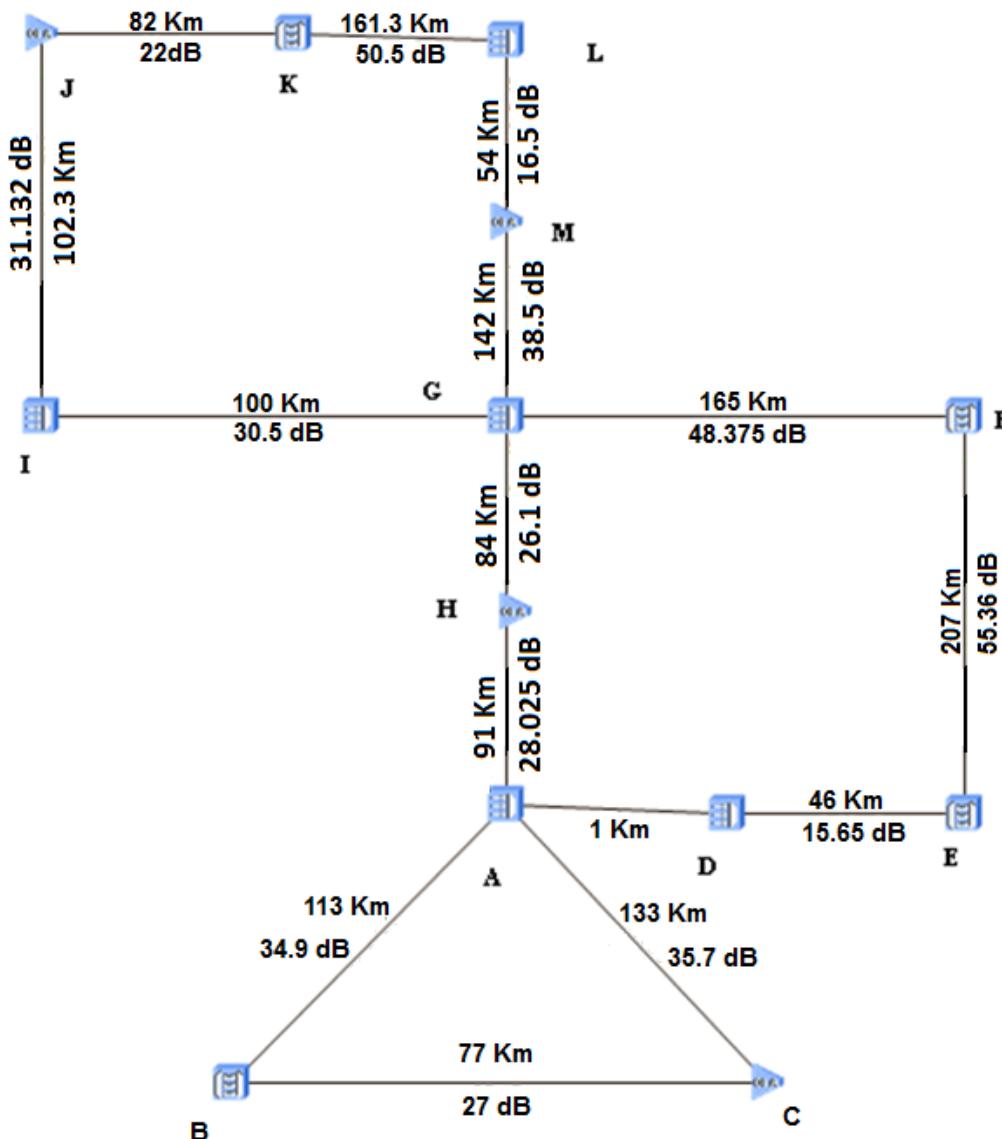
٣) التحضير لتحصيلات متعددة على الليف : يسمح هذا النمط بأخذ تحصيلات متعددة على نفس الليف بتحديد عدد مرات القياس و التأخير بينهم.

٤) أخذ المعدل للقياسات : عندما تحتاج لدقة قصوى تستطيع إضافة معير للاستقطاب عند بوابة خرج المصدر و آخر عند بوابة دخل المستقبل ثم استخدام نمط أخذ المعدل للقياسات . هنا يتم أخذ معدل PMD عند استقطابات مختلفة مما يزيد من الدقة.

#### ٤-٥ - نتائج قياس PMD و تحليلها :

تتألف الشبكة المدروسة من عدة مواقع يربط فيما بينها ليف من نوع G.653 و هذه الموقع متباينة عن بعضها بمسافات مختلفة و كل موقع يضم عدداً من التجهيزات . هذه التجهيزات عبارة عن مجموعة من القوائم التي تحوي بطاقات مختلفة حسب مواصفات الموقع و بعده عن بقية الموقع و كمية المعلومات المراد إرسالها منه فمثلاً كل الموقع تضم كروت إرسال و استقبال لكن بعضها فقط يحوي كروت تضخيم أو وحدات تعويض تشتن أو وحدات ADM .

الشكل التالي يبين مخطط الشبكة المدروسة



الشكل ٢.٥ : مخطط الشبكة المدروسة

قمنا باستخدام مقياس EXFO FTP-5500 لإجراء قياسات PMD على الليف في الشبكة و ذلك لمعرفة إذا كان بالإمكان رفع معدل نقل البيانات حتى 40Gbps علمًا أن القياسات قد أخذت باتجاهين فمثلاً من أجل المواقع A,B قمنا بأخذ القياسات من A إلى B في الموقع A ومن B إلى A في الموقع B على وصلة الليف نفسها و كانت النتائج كالتالي :

Direction		Distance (Km)	PMD	PMD Coefficient
From	To		( ps)	(ps /km <sup>1/2</sup> )
B	A	113	3.679	0.346
			3.405	0.320
C	A	133	1.847	0.160
			1.952	0.185
C	B	77	2.052	0.234
			2.232	0.225
A	D	1	0.081	0.081
			0.118	0.118
D	E	46	0.521	0.077
			0.542	0.079
E	F	207	13.3	0.924
			13.5	0.938
F	G	165	1.383	0.108
			1.485	0.116
G	H	84	2.98	0.325
			6.432	0.702
H	A	91	3.959	0.415
			2.183	0.249
G	M	142	6.266	0.526
			7.352	0.617
M	L	54	2.766	0.376
			3.875	0.527
L	K	161	11.719	0.923
			11.719	0.923
K	J	82	2.617	0.289
			7.026	0.776
J	I	102	5.681	0.562

			4.193	0.415
١	G	100	5.471	0.547
			7.469	0.747

الجدول ١٢.٥ : نتائج القياس

بعد تحليل القياسات يتتبّن معنا ما يلي:

الرقم	المقطع	التحليل	النتيجة
١	E – F L – K	لا يمكن استخدام 40G لأن * PMD>8ps	فشل بمرور البيانات
٢	B – A – H	إن قيمة PMD مقبولة في هذا المقطع لكننا نحتاج إلى إعادة توليد الإشارة في A لاستخدام 40G	تمر البيانات بوجود معيد توليد لتصحيح شكل الإشارة بعد تشوّهها
٣	M – G – H	إن قيمة PMD مقبولة في هذا المقطع لكننا نحتاج إلى إعادة توليد الإشارة في G	تمر البيانات بوجود معيد توليد لتصحيح شكل الإشارة بعد تشوّهها
٤	G – F	يمكن استخدام 10G و لا يمكن استخدام 40G لعدم توفر طول موجة قادر على الاستمرار على نفس الليف بدون وجود مكرر و لا إمكانية لوجود مكرر بسبب الطبيعة الجغرافية الصحراوية.	فشل بمرور البيانات
٥	J – I – G	إن قيمة PMD مقبولة في هذا المقطع لكننا نحتاج إلى إعادة توليد الإشارة في G	تمر البيانات بوجود معيد توليد لتصحيح شكل الإشارة بعد تشوّهها
٦	E – D – A	يمكن استخدام 40G لأن الليف المستخدم	تمر البيانات

	G.652 هو من نوع E و D بين	
--	---------------------------	--

### الجدول ١٣.٥ : تحليل نتائج قياس PMD

\* يجب أن تكون قيمة PMD أكبر بـ 3 مرات من قيمة التأخير الوسطية و التي هي بحدود 2.5ps و هي القيمة المقبولة بحيث لا يتجاوز التأخير قيمة 21 دقيقة خلال عام بحيث نحصل على أداء جيد لنظام الاتصالات المستخدم .

## الخلاصة :

بوجود نفس الليف في هذه الشبكة لا يمكن الانتقال من استخدام  $10\text{Gb/s}$  إلى  $40\text{Gb/s}$  لذا تم اللجوء إلى العمل على الاستفادة من الليف الحالي ما أمكن و قد تبين أنه بالإمكان وضع ١٠ قنوات بالخدمة ضمن نطاق C-band و بمسافة فاصلة بين القنوات بقيمة  $\text{GHz} 100$  على الأطوال الموجية التالية :

Channel [THz]	Ch1	Ch2	Ch3	Ch4	Ch5	Ch6	Ch20	Ch22	Ch32	Ch40
Value	192.1	192.2	192.3	192.4	192.5	192.6	194.0	194.2	195.2	196.0

الجدول ١٤.٥ : قيم الأطوال الموجية المستخدمة

و كل قناة تحمل  $10\text{G}$  و كلها مرسلة على زوج ألياف من أصل ٣٢ ليف في الكابل الفقاري في الشبكة مع الأخذ بعين الاعتبار أنه تم وضع وحدات لتعويض التشتيت DCM . أما ما يخص الكابل الجديد فهو مؤلف من ٩٦ ليف و قادر على حمل ٨٠ قناة مع إمكانية وضع  $40\text{G}$  على كل قناة و قد تم مده بنفس شكل المخطط السابق و قد تأخر وصول تقنية  $40\text{G}$  للأسوق بسبب تأخر تطورها و كلفتها العالية لكن حالياً بدأ الكثير من المستثمرين بطلبها .

أما بالنسبة لتقنية  $100\text{G}$  فيتميز الوصول إلى هذه التقنية بالحصول على مسافة نقل تصل لأكثر من  $1000\text{Km}$  و مسافة فاصلة بين القنوات بحدود  $50\text{GHz}$  و استعمال كامل نطاق C-band و توسيعه و التوافق مع أنظمة DWDM الموجودة سابقاً و التي تستخدم معدلات نقل تصل حتى  $40\text{G}$  [ ٢٣ ]. لكن الوصول إلى تطبيق هذه التقنية حالياً يستلزم إعادة تأهيل الشبكة مجدداً من حيث إضافة كروت إضافية و هذا يزيد الكلفة .

## جدول الاختصارات :

الاختصار	الشرح
WDM	Wavelength Division Multiplexing
CWDM	Coarse Wavelength Division Multiplexing
DWDM	Dense Wavelength Division Multiplexing
RZ	Return to Zero
NRZ	Non Return to Zero
ADM	Add Drop Multiplexer
OADM	Optical Add Drop Multiplexer
De-MUX	De-Multiplexer
MUX	Multiplexer
BER	Bit Error Rate
SMF	Single Mode Fibers
MMF	Multi Mode Fibers
EDFA	Erbium – Doped Fiber Amplifier
EOM	Electro Optical Modulator
EAM	Electrical Absorption Modulator
ASE	Amplified Spontaneous Emission Noise
CD	Chromatic Dispersion
PMD	Polarization Mode Despersion
SRS	SRS Stimulated Raman Scattering
SBS	Stimulated Brillouin Scattering
XPM	Cross Phase Modulation
SPM	Self Phase Modulation
FWM	Four Wave Mixing
DGD	Diferential Group Delay
DCF	Dispersion Compensation Fiber
DCM	Dispersion Compensation Module
JMEA	Jones Matrix Eigen analysis
INT	Inter Ferometric Method
FA	Fixed Analyzer

## References :

- [ 1 ] J . Hecht , "City of light : The story of Fiber Optics ". New York : Oxford University press , 1999 .
- [ 2 ] Hetch , J.." Understanding Fiber Optics" . New Jersey : Prentice Hall , 2002 .
- [ 3 ] Gouind P . Agrawal , " Fiber Optic Communication Systems" , 2002 .
- [ 4 ] Le Nguyen Binh , " Digital Optical Communications" , 2009 .
- [ 5 ] Gerd Keiser , "Optical Fiber Communications " , Third Edition , 2000 .
- [ 6 ] Donald J . Sterling . Jr . "Technician's Guide to Fiber Optics" , second Edition .
- [ 7 ] B . Razavi , " Design of Integrated Circuits for Optical Communication ". New York : Mc Graw – Hill , 2003 .
- [ 8 ] Winzer , P . J . et al , Photonics Technology letters , IEEE , 2003 .
- [ 9 ] Black , U.." Optical Networks – Third Generation Transport Systems", 2002 .
- [ 10 ] Faraj P. et al , "Transparent Optical Networks" , 2003 .

[ 11 ] J . J . Refi , “ Optical Fibers for Optical networking ,” 1999

[ 12 ] Introduction to DWDM for Metropolitan Area Network .  
[www.cisco.com](http://www.cisco.com)

[ 13 ] De Cusatis , C., “ Dense Wavelength division multiplexing devices for metropolitan area data com and telecom networks .” , June 2000

[ 14 ] R. Sabella, “ Tutorial : Key elements for WDM Transport Networks, 2000.

[ 15 ] Ashwin Gumaste, Tony Antony , "DWDM Network Designs and Engineering solution", 2003 .

[ 16 ] “ Four-photon Mixing and High-speed WDM systems” , R.W Tkach et al., Journal of light wave Technology , May 1995 .

[ 17 ] Hodzie , A. et. Al. , “ 10Gb/s based NRZ DWDM system Using polarization switching” , Electronic letters 2003 .

[ 18 ] Peter J. Winzer , “ Advanced Optical Modulation Formats” , 2006

[ 19 ] Edward Collett , “ Field guide to polarization” , SPIE Press Book, 2005.

[ 20 ] Characterization of the PMD distribution of the PMD Journal of Networks , U01.5, No.2 , February 2010 .

- [ 21 ] Agrawal , G. P. , et al . 1988 ." Dispersion penalty for 1.3 micron light wave Systems with multimode semi conductor lasers" .
- [ 22 ] F. Buchali and H. Bülow, " Adaptive PMD Compensation by electrical and optical techniques ." 2004 .
- [ 23 ] " 40 G & 100 G overview" ,Nordic Infrastructure for Research & Education 20/03/2009.
- [ 24 ] performance Analysis of Polarization effects Photonics Technology Letters, IEEE.org.
- [ 25 ] pre-Compensation Technique in WDM system. Optics Info Base.org .
- [ 26 ] EXFO Electro-Optical Engineering Inc.
- [ 27 ] Characteristics of a dispersion-shifted, single mode optical Fibre and Cable G.653. ITU-T 07/2010
- [ 28 ] Characteristics of a single-mode optical Fibre and cable G.652. ITU-T 11/2009.
- [ 29 ] Y R Zhou , A Lord and E S R Sikora , " Ultra-long-haul WDM Transmission Systems ", BT Technology Journal . 2002