جامعة دمشق

وزارة التعليم العالي والبحث العلمي

كلية الهندسة الميكانيكية والكهربائية

قسم هندسة الإلكترونيات والاتصالات

تحسين أداء شبكات الاتصالات البصرية غير الفعالة باستخدام ألياف متعددة النوى

Improving the Performance of Passive Optical Communication Networks using Multi-Core Fibers

رسالة مقدمة لنيل درجة الماجستير في هندسة الاتصالات المتقدمة

إعداد

المهندس عروة يوسف سلمان

بإشراف

المشرف العلمي **المشرف المشارك**

د.م حفصة الحموي **د.م عفيف صقور**

العام الدراسي

2022-2021

صفحة قرار الحكم مع توقيع اللجنة

تصريح خطي

أنا الموقع أدناه أصرح بعلمي الكامل وقبولي:

١ .أن كل ما ينتج عن البحث والأطروحة هو ملكية فكرية ومالية بالتشارك مع جامعة دمشق، وأنني ألتزم بأخذ موافقة الجامعة في حال رغبتي بنشر البحث أو الأطروحة أو جزء منها نصاً أو مضمونا خارج اطار الجامعة (من دور نشر أو مكتبات أو مواقع الكترونية أو غيرها من وسائل النشر)

٢ .أنه لا يوجد أي جزء من هذه الأطروحة تم اقتباسه من عمل علمي آخر أو أنجز للحصول على شهادة أخرى في جامعة دمشق أو أية جامعة أو معهد تعليمي داخل أو خارج الجمهورية العربية السورية.

الاسم والتوقيع

شكر وتقدير

أتقدَّم بأسمى آيات العرفان والمحبة إلى الذين حملوا أقدس رسالة في الحياة، إلى من أضاء العقول ورسم الدروب تعباً وجهداً، إلى من قدّم العون والمساعدة في أروع صورها، إلى من تعجز الكلمات عن تقديم الشكر والتقدير لهم، إلى جميع الأساتذة الأفاضل الذين ما بخلوا بعلمٍ أو وقتٍ، وأخص بالذكر الدكتور علي العلي والدكتور محمد الحسين والدكتورة حفصة الحموي والدكتور عفيف صقور اللذين تفضلوا بتقديم جلِّ اهتمامهم وكريم إشرافهم حتى أبصر هذا العمل النور وخرج إلى حيز الوجود.

أسأل الله تعالى أن يتغمد أبي الغالي برحمته ويسكنه فسيح جناته الذي كان قدوتي ومثلي الأعلى الذي أعانني على طاعة الله وحلّاني بالأخلاق الحميدة، أمي الحنونة صاحبة أجمل وأطيب قلب في الدنيا والتي كان دعائها زاد سفري وترحالي، وأخي اللون الجميل في حياتي الذي طالما وقف بجانبي وزاد من همتي.

أبعث رسائل امتنانٍ إلى كلِّ من ساندني قولاً أو فعلاً حتى وصل بحثي لمبتغاه وأخص بالذكر أصدقائي الأعزاء (م. سومر حمود ، م. حبيب حاتم ،باسل الجعيلة).

أتمنى أن تعود نتائج واستنتاجات هذا البحث بالفائدة العلمية والعملية لكل مهندس اتصالات ولكل طالب دراسات عليا (ماجستير أو دكتوراة).

فهرس المحتويات

Table of Contents

المحتوى **رقم الصفحة**

قرار الحكم مع توقيع اللجنة I

التصريح الخطي II

شكر وتقدير..... III

فهرس المحتويات..... IV

فهرس الأشكال.....VIII

فهرس الجداول..... XI

قائمة المصطلحات والاختصارات..... XII

قائمة الرموز XV

المستخلص XVII

المستخلص باللغة الانكليزية XVIII

الفصل الأول: الإطار العام للبحث

مُقدِّمة عامة: 2

بعض الدراسات السابقة 4

مشكلة البحث.....4

هدف البحث:.... 4

أهمية البحث: 4

مسوغات البحث: 5

محددات البحث: 5

حدود البحث.....5

منهج البحث وأدواته:.....6

بنية الرسالة : 6

الفصل الأول: مفاهيم أساسية في الضوء

1– 1 طبيعة الضوء 9

1–1–1 الطبيعة الموجية للضوء.....9

1–1–2 الطبيعة الجسيمية للضوء. 11

1–2 الأمواج الكهرطيسية..... 11

1–2–1 الأمواج في بعد واحد..... 11

1–2–2 الأمواج الكهرطيسية في الفراغ..... 14

1–3 فتحة النفوذ العددية..... 15

1–4 الانعراج..... 17

1–5 تشتت المادة وتشوه النبضة..... 18

1–6 الانعكاس عند حدود الفصل..... 23

1–7 الانعكاس الداخلي الكلي..... 28

1–8 الاستقطاب 30

الفصل الثاني: الألياف البصرية

2–1 مقدمة 35

2–2 البنية العامة لليف، وآلية توجيه الضوء..... 36

2–2–1 البنية العامة لليف..... 36

2-2-2 آلية توجيه الضوء ضمن الليف..... 37

3-2 مواد تصنيع الألياف البصرية..... 39

4-2 الألياف البصرية أحادية النمط درجة قرينة الانكسار..... 40

1-4-2 حجم البقعة النمطية..... 41

5-2 التشتت في الألياف البصرية وحيدة النمط درجةأو متدرجة قرينة الانكسار 41

6-2 التخامد في الألياف البصرية..... 43

1-6-2 الامتصاص، والتبعثر..... 44

2-6-2 التأثيرات الهندسية.....47

7-2 الألياف البصرية متدرجة قرينة الانكسار..... 48

الفصل الثالث: تقانات التجميع في الألياف البصرية

1-3 مقدمة..... 52

2-3 نظام التجميع بتقسيم الزمن بصرياً OTDMA..... 54

3-3 نظام تجميع الحوامل الفرعية SCM 55

4-3 التجميع بتقسيم طول الموجة(WDM) :.....56

5-3 التجميع بتقسيم الاستقطاب (PMD):..... 59

6-3 التجميع المزدوج بتقسيم طول الموجة، وتقسيم الاستقطاب (WDM and PMD): 59

7-3 التجميع بتقسيم الكود أو الرمز بصرياً OCDMA: 60

8-3 تقانة التجميع MGDM:..... 61

9-3-التجميع بتقسيم المكان: 61

10-3 الشبكات البصرية غير الفعّالة :.....64

11-3 استعمال ألياف متعددة النوى في شبكة المنطقة المحلية..... 66

الفصل الرابع: الألياف متعددة النوى

4-1 البنية ، المبادئ وميزات الألياف الضوئية أحادية النمط..... 70

4-2 الألياف متعددة النوى (MCF) :..... 72

4-3 التداخل المتبادل (cross talk)..... 73

4-4 كيفية حقن الإشارة في MCF 76

الفصل الخامس: النتائج والمناقشة

5-1 النتائج، والمناقشة 79

5-1-1 تصميم MCF باستعمال COMSOL..... 79

5-2 حساب التداخل 85

الاستنتاجات والتوصيات 96

المراجع 98

فهرس الأشكال List of Figures

رقم الشكل	العنوان	الصفحة
الشكل 1−1	الطيف الكهرومغناطيسي، يُظهر الأسماء المرتبطة بمناطق الترددات المختلفة	9
الشكل 1−2	جزء من الطيف الكهرطيسي، تفصل الخطوط الشاقولية المتقطعة المنطقة المرئية عن فوق البنفسجية و تحت الحمراء	10
الشكل 1−3	شكل الموجة في لحظة معينة.	12
الشكل 1−4	يوضح تغير سرعة الموجة بتغير وسط الانتشار	13
الشكل 1−5	الحقل الكهربائي في الفراغ (النقطة z) عند زمنين مختلفين t و t+Δt.	14
الشكل 1−6	مستقبل بصري بمكشاف ضوئي موضوع في المستوي البؤري للعدسة.	16
الشكل 1−7	استقبال الليف الأشعة الضوئية الواردة ضمن زاوية قبول الليف θa..	16
الشكل 1−8	ورود موجة مستوية(حزمة أشعة متوازية) على فتحة	17
الشكل 1−9	التداخل البناء والهدام .	17
الشكل 1−10	فرق المسير الضوئي بين موجتين.	18
الشكل 1−11	أهداب الانعراج	18
الشكل 1−12	اتساع النبضة الذي يسببه الانتشار خلال وسط مشتت	19
الشكل 1−13	يسبب التشتت خسارة في اتساع إشارة تماثلية.	19
الشكل 1−14	زمن الانتشار لكل وحدة طول. (a) وسط غير مشتت . (b) وسط مشتت	20
الشكل 1−15	تشتت الضوء الأبيض عند سقوطه على موشور.	21
الشكل 1−16	(a)اعتماد قرينة الانكسار لزجاج (SiO2) على طول الموجة.	22
الشكل 1−17	تشتت المادة للسيليكا.	23
الشكل 1−18	سقوط شعاع ضوئي على حد فاصل بين وسطين	24
الشكل 1−19	السطوح العاكسة في نزام ليفي	25
الشكل 1−20	انقسام الانعكاس عند حد الفصل	26
الشكل 1−21	الانعكاسية عند سطح بيني من هواء الى زجاج	26
الشكل 1−22	الانعكاسية عند سطح بيني من زجاج الى هواء	27
الشكل 1−23	موجة ترد عموديا على حد فاصل	27
الشكل 1−24	ورود شعاع ضوئي من وسط زي قرينة انكسار اكبر الى وسط ذي قرينة انكسار أقل	29
الشكل 1−25	تمثيل الحقل E في الفراغ	31
الشكل 1−26	معاملات حالة الاستقطاب الاهليلجي	32
الشكل 1−27	تمثيل لحظي لموجة مستقطبة خطياً	33
الشكل 2−1	ارتفاع معدل البت بالمسافة خلال الفترة الزمنية(1850 − 2000)	35
الشكل 2−2	البنية العامة لليف البصري.	37
الشكل 2−3	a) ليف بصري متعدد الأنماط. b) ليف بصري أحادي النمط.	37

الشكل 2-4	معاملات توجيه الضوء.	38
الشكل 2-5	قرينة الانكسار والأشعة المرسلة عبر SI/SMF	40
الشكل 2-6	توزع الحقل للنمط الأساسي في ليف SMF	41
الشكل 2-7	مركبتي الحقل للإشارة المنقولة عبر ليف ذي قرينة انكسار مضاعفة	42
الشكل 2-8	تغير زمن وصول مركبتي النبضة المدخلة إلى الليف نتيجة لتشتت أنماط الاستقطاب	43
الشكل 2-9	آليات التخامد في الليف البصري.	44
الشكل 2-10	تبعثر رايلي.	45
الشكل 2-11	التخامد بتابعية الطول الموجي.	46
الشكل 2-12	منحني التخميد لليف خال تقريباً من شوائب OH.	46
الشكل 2-13	انتشار الأشعة في الغلاف في منطقة انحناء الليف.	47
الشكل 2-14	ليف بصري متدرج قرينة الانكسار	48
الشكل 2-15	نموذج درجي لليف متدرج	49
الشكل 2-16	مسارات الأشعة على طول ليف GI/MMF.	49
الشكل 3-1	إحصائيات أنماط الألياف المستعملة في شبكات المناطق المحلية (LANs)	53
الشكل 3-2	مخطط التجميع بتقسيم الزمن	54
الشكل 3-3	مخطط صندوقي لجهاز إرسال /استقبال يستعمل تقانة OTDM	55
الشكل 3-4	تقانة التجميع SCM	56
الشكل3 -5	مخطط لنظام تجميع التقسيم حسب طول الموجة WDM	57
الشكل 3-6	التباعد الطيفي في حالة DWDM	58
الشكل 3-7	أنواع شبكات النفاذ باستعمال تجميع التقسيم حسب طول الموجة WDM	58
الشكل 3-8	مبدأ التجميع بتقسيم الاستقطاب	59
الشكل 3-9	مبدأ التجميع بتقسيم طول الموجة و التجميع بتقسيم الاستقطاب معاً	60
الشكل 3-10	سلسلة تراسل OCDMA	60
الشكل 3-11	بنية نظام ضوئي يستعمل تقانة التجميع MGDM	61
الشكل 3-12	الأبعاد المادية للتعديل وتجميع الأمواج الكهرومغناطيسية	63
الشكل 3-13	مقارنة بين شبكتين إحداهما تستعمل MCF وأخرى تستعمل SMF	67
الشكل 4-1	بنية الليف الضوئي	70
الشكل 4-2	فتحة النفوذ العددية وزاوية القبول والزاوية الحرجة في الليف الضوئي	70
الشكل 4-3	مقارنة بين الليف أحادي النمط والليف متعدد الأنماط .	71
الشكل 4-4	الحدّ من التداخل المتبادل بين النوى في (a) – (d :MCF) تخطيط غير متجانس	72
الشكل 4-5	الفرق بين النوع المقترن والنوع غير المقترن لليف متعدد النوى	73
الشكل 4-6	الليف متعدد النوى	73
الشكل 4-7	التداخل المتبادل في MCF	74
الشكل 4-8	كيفية حقن الإشارة في الألياف	76

الشكل 4–9	طريقة الربط بين الألياف متعددة النوى والليف وحيد النواة	76
الشكل 4–10	كيفية حقن الإشارة في MCF	77
الشكل 5–1	مراحل تصميم الليف	81
الشكل 5–2	شدة الحقل للتصميم النهائي	81
الشكل 5–3	شدة الحقل للنواة المركزية	82
الشكل 5–4	شدة الحقل للنواة المركزية عند a=1.7µm	82
الشكل 5–5	شدة الحقل للنواة المركزية عند a=2.73µm	83
الشكل 5–6	منحني التخامد للتصميم النهائي (19 نواة)	83
الشكل 5–7	منحني التشتت للتصميم النهائي (19 نواة)	84
الشكل 5–8	قيمة التخامد عند طول الموجة 1550nm	84
الشكل 5–9	قيمة التشتت عند طول الموجة 1550nm	85
الشكل 5–10	التصميم النهائي للنوى	85
الشكل 5–11	منحني التداخل الحاصل للنواة المركزية	86
الشكل 5–12	منحني التداخل الحاصل لإحدى نوى الحلقة الداخلية	87
الشكل 5–13	التداخل لإحدى نوى الحلقة الوسطى	88
الشكل 5–14	التداخل لإحدى نوى الحلقة الخارجية	89
الشكل 5–15	تداخل النواة المركزية عند a=1.7µm	90
الشكل 5–16	تداخل النواة المركزية عند a=2.73m	90
الشكل 5–17	تداخل النواة المركزية بالتدريج عند µm (2 , 1.7 , 2.73) = a	91
الشكل 5–18	مقارنة بين العمل الحالي والمرجع.	92
الشكل 5–19	معدل الخطأ لكل بت؛ تبعاً للاستطاعة المرسلة	93
الشكل 5–20	منحني الجودة؛ تبعاً للاستطاعة المرسلة	93
الشكل 5–21	مخطط العين عندما تكون الاستطاعة المرسلة 7− dBm	94
الشكل 5–22	مخطط العين عندما تكون الاستطاعة المرسلة 4− dBm	94
الشكل 5–23	مخطط العين عندما تكون الاستطاعة المرسلة 2 dBm	95
الشكل 5–24	معدل الخطأ لكل بت؛ تبعاً للاستطاعة المرسلة.	95
الشكل5–25	منحني الجودة؛ تبعاً للاستطاعة المرسلة.	96

فهرس الجداول List of Tables

رقم الجدول	العنوان	الصفحة
الجدول 2-1	أجيال الألياف البصرية	36
الجدول 2-2	أنواع الألياف؛ بحسب مواد التصنيع.	39
الجدول 2-3	النوافذ الضوئية التي تعمل عندها الألياف البصرية.	47
الجدول 3-1	طول الليف البصري المستعمل في شبكات (LANs) في كل من أوربا الغربية والولايات المتحدة	53
الجدول 3-2	مزايا وعيوب pon	66
الجدول 4-1	مقارنة بين الألياف متعددة النوى والليف وحيد النواة	68
الجدول 5-1	البارامترات المستعملة في تصميم الليف	80
الجدول 5-2	مقارنة الدراسة الحالية بالدراسة السابقة	91

قائمة المصطلحات والاختصارات List of Terms and Abbreviations

المصطلح باللغة الإنكليزية	الاختصار	المصطلح باللغة العربية
Attenuation	–	تخامد
Cladding	–	الغلاف
Core	–	النواة
Crosstalk	–	التداخل
Cladding diameter	CD	قطر الغلاف
Coupled mode theory	CPT	نظرية النمط المقترن
Coupled power theory	CMT	نظرية الطاقة المقترنة
Coarse wavelength division multiplexing	CWDM	التجميع بتقسيم طول الموجة الخشن
Dense wavelength division multiplexing	DWDM	التجميع بتقسيم طول الموجة الكثيف
Diffraction	–	الانعراج
Dispersion	–	التشتت
Electrical time division multiplexing	ETDM	التجميع بتقسيم الوقت الكهربائي
Erbium doped fiber Amplifier	EDFA	المضخمات الضوئية المشابة بعنصر الإربيوم
Electromagnetic waves	EW	الأمواج الكهرومغناطيسية
Fundamental mode	FM	النمط الأساسي
Graded index optical fiber	GIOF	الألياف البصرية متدرجة قرينة الانكسار
Jacket	–	الغطاء

شبكة المنطقة المحلية	LAN	Local Area Network
قطر حقل النمط	MFD	Mode field diameter
التجميع بتقسيم طول الموجة عالي الكثافة	U-DWDM	Ultra Dense wavelength division multiplexing
التجميع بتقسيم طول الموجة	WDM	wavelength division multiplexing
ليف متعدد الانماط	MMF	Multimode fiber
شبكة المنطقة الواسعة	MAN	Mateporlian Aria network
الفتحة العددية	NA	Numerical aperture
حافة الغلاف الخارجية	OCT	Outer cladding thickness
الليف البصري	OF	Optical fiber
وصول تعدد الإرسال بتقسيم الكود البصري	OCDMA	Optical code division multiplexing access
تشتت نمط الاستقطاب	PMD	Polarization mode dispersion
الاستقطاب	-	Polarization
الانعكاس	-	Reflection
مكررات	-	Repeaters
الاختلاف في قرينة الانكسار	RID	Refractive index difference
الليف وحيد النمط	SMF	Single mode fiber
تجميع الحوامل الفرعية	SCM	Subscriber carrier multiplexing
التجميع بتقسيم المكان	SDM	Space division multiplexing

وحيد النمط درجي الخطوة	SISM	Step index single mode
الفتحة الزمنية	T_S	Time slot
تشتت المادة	D_M	Dispersion material
الليف يصل الى منزل المشترك	FTTH	Fiber to the home
الليف يصل الى مدخل العمارة	FTTB	Fiber to the building
الليف يصل الى الرصيف	FTTC	Fiber to the curb
التجميع بتقسيم مجموعة الانماط	MGDM	Mode Group Division Multiplexing
الليف متعدد النوى	MCF	Multicore fiber
نظام ترميز	NR	Non return Zero
التجميع بتقسيم الزمن البصري	OTDM	Optical time division multiplexing
بلاستيك مغطى بالسليكا	PCS	Plastic coated silica
جودة الخدمة	QoS	Quality of Service
نظام نقل الاشارة الراديوية عبر الليف البصري	RoF	Radio over fiber
ليف بقرينة انكسار درجي	SI	Step index

قائمة الرموزList of Symbols

المصطلح باللغة الإنكليزية	شرح الرمز باللغة العربية
طول الموجة الضوئية	λ_n
سَعَةُ الاهتزاز	$\boldsymbol{\psi_m}$
الفتحة العددية	N_A
زاوية القبول العظمى	θ_a
قرينة انكسار الهواء	n_0
فرق المسير الضوئي بين الموجات	δ
فرق الطور	φ
العرض الطيفي للمنبع	$\Delta\lambda$
توسع النبضة لواحدة الطول	$\Delta(\tau/L)$
معامل تشتت المادة	D_M
معامل الانعكاس	ρ_p
الانعكاسية	R
الزاوية الحرجة	θ_c
طول موجة القطع	λ_c
تردد القطع	V_c
قطر النمط للحقل	MFD
معامل التشتت المادي	$\Delta\tau_W$

معامل التخامد	α_A
عرض النبضة البصرية	Tc
عرض النبضة للإشارة الكهربائية	Tb
التداخل بين النوى	XT
معامل اقتران النمط	K_{pq}
نصف قطر الانحناء	R_b
ثابت الانتشار	B
المسافة بين النوى	Λ
تابع بيسل المعدل	$K1_{w1}$
الفرق النسبي بين قرينتي الانكسار	Δ
العدد الموجي	k

المستخلص

- **خلفية البحث**

أدى اقتراب الأنظمة الحالية بسرعة من الحد الأقصى لمقدار المعلومات التي يمكن إرسالها عبر قناة معينة و ظهور إنترنت الأشياء والتطبيقات التي تتطلب سعات عالية إلى مشكلة السعة، ومن أجل التغلب على حدود السعة في البنية التحتية لاتصالات الألياف البصرية الحالية؛ فإن زيادة الكفاية المكانية؛ باستعمال المقطع العرضي المتوفر من الألياف أحد الحلول الممكنة ،لذلك تشكل الألياف متعددة النوى (MCF) في نطاق تعدد الإرسال بتقسيم المكان (SDM) حلاً واعداً لقضية الكفاية المذكورة أعلاه.

- **هدف البحث**

التغلب على حدود السعة في البنية التحتية لاتصالات الألياف البصرية الحالية

- **المواد والطرائق**

أُستعينَ عند إجراء البحث بالبرامج الآتية : Matlab ، Optisystem 16 ، Comsol

- **النتائج العملية**

قُلّلت قيمة التداخل المتبادل بين النوى مقارنة بقيمة مرجعية(dB 42−)كما بين البحث[59]

- **الاستنتاجات من وجهة نظر الباحث**

1− أظهرت النتائج وجود قيم أمثلية لنصف قطر النواة(a=2μm) والمسافة بين النوى(Λ= 26.5 μm) و التي أعطت أقل قيمة للتداخل المتبادل بين النوى .

2 − يمكن اعتبار الاستطاعة المرسلة 3dBm− قيمة أمثلية حيث أعطت قيمة جيدة لعامل الجودة، ومعدل خطأ البت عند الطول 50km .

3− بلغت قيمة التداخل المتبادل بين النوى في دراستنا dB 91− بالمقارنة مع المرجع [59] بلغت 42dB− وبالتالي نلحظ وجود تحسين في تقليل قيمة التداخل المتبادل بين النوى.

4− وجود علاقة طردية بين التداخل المتبادل بين النوى المحيطة بالنواة المدروسة وعدد النوى المحيطة بتلك النواة

الكلمات المفتاحية : الألياف متعددة النوى، التجميع بتقسيم المكان، التداخل، الشبكات البصرية غير الفعالة PON

Abstract

The rapid approach of current systems to the maximum amount of information that can be transmitted over a given channel and the emergence of the Internet of Things and applications that require high capacities have led to the capacity problem. Fiber is the most effective solution.

Therefore, multi-core fiber (MCF) in the SDM band constitutes a promising solution to the above efficiency issue.

-Research objective:

Overcoming the capacity limits in the current fiber optic communications infrastructure

-MATERIALS AND METHODS:

The following programs were used when conducting the research: Matlab, Optisystem, Comsol

-Practical results:

The value of mutual interference between cores has been reduced compared to a reference value (−42 dB) [59].

-Conclusions from the researcher's point of view:

1- The results showed that there are optimal values for the radius of the cores (a=2μm) and the distance between the cores (Λ= 26.5 μm), which gives the lowest value for the mutual interference between the cores

2- The transmitted power can be counted. -3dBm An optimum value that gives a good value for the quality factor, and the bit error rate at the length of 50 km.

3- The value of the mutual interference between the cores in our study was -91 dB, while in the reference [59] it was -42dB, and therefore we notice an improvement in reducing the value of the mutual interference between the cores

4-There is a direct relationship between the mutual overlap between the cores surrounding the cores studied and the number of cores surrounding that core

Key words: multi-core fibers, space-division multiplexing, interference, passive optical networks PON.

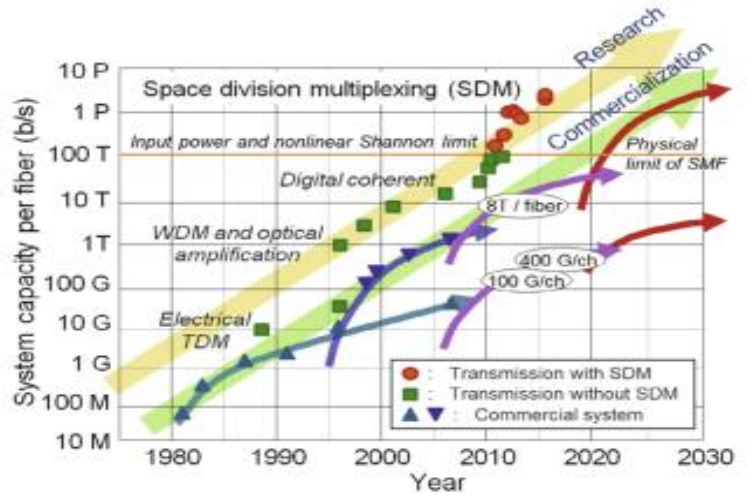
الإطار العام للبحث

Research General Framework

مُقدِّمة عامة:

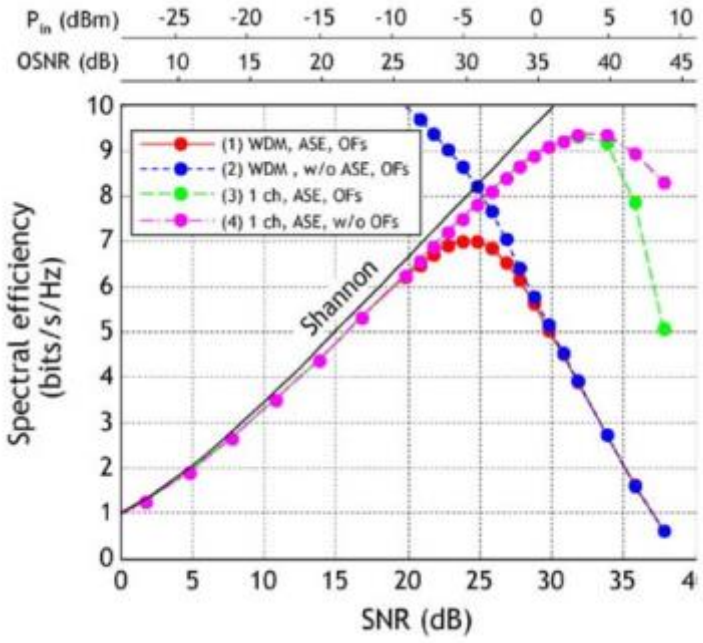
أصبح اتصال الألياف الضوئية العمود الفقري للبنية التحتية للاتصالات التي تدعم الإنترنت، وعدداً من تطبيقات البيانات الأخرى ذات الحجم الكبير، حيث يُحّول كل تطبيق قائم على الإنترنت إلى شعاع من الفوتونات التي تنتقل عبر مليارات الكيلومترات من الألياف الضوئية التي نُشِرَت حول العالم. ازداد في العقود الأخيرة الطلب على حركة مرور الشبكة بصورة مطردة بلا توقف ، وهذا نتيجة مباشرة لظهور تقانات وتطبيقات جديدة عدلت بطرق معينة تفاعلاتنا الاجتماعية ومعدلنا الذي نستهلك فيه البيانات ، كما أدى الارتفاع الأخير في التطبيقات التي تركز على البيانات من آلة وظهور ظاهرة تسمى "إنترنت الأشياء" إلى ارتفاع هذا الطلب إلى آفاق جديدة لم يتخيلها مهندسو الشبكات على الإطلاق، وقد شهدت الشبكات البصرية نموًا أيضًا في العقود الأخيرة مع تطبيق تقانات جديدة للتعامل مع الطلب المتزايد وأيضًا لخفض التكاليف التي تنطوي عليها هذه الشبكات، حيث أُدخِلَ تعدد الإرسال بتقسيم الطول الموجيWDM [1] وتعدد الإرسال بتقسيم الطول الموجي الكثيف (DWDM) والذي كان النهج الرئيس لتلبية الطلب المتزايد عبر الشبكات البصرية المختلفة في العقد الأخير حيث اكتسب الكشف المتماسك [2] أيضًا قدرًا كبيرًا من الأهمية؛ لأنه يزيد بصورة كبيرة من قدرة الأنظمة من خلال زيادة نسبة الإشارة إلى الضجيج (SNR) لقناة بصرية؛ مقارنة بالكشف المباشر. ومن ثم يمكن استعمال تعديل السعة التربيعية عالية الكفاية الطيفية (QAM) التي ترسل الإشارة الضوئية في كل من السعة ومكونات الطور. تتوفر في الوقت الحاضر أنظمة النقل البصري المتماسك الرقمي [3] بسرعة 200 جيجا بت في الثانية، وعلى الرغم من أن كل هذه التقانات الجديدة سمحت بزيادة مضاعفة في قدرة الأنظمة الضوئية الحالية إلا أنها ليست كافية للتعامل مع النمو الهائل الذي يختبره الطلب على حركة المرور في الوقت الحاضر. وعلاوة على ذلك تقترب الأنظمة الحالية بسرعة من أكبر قدر ممكن من المعلومات التي يمكن نقلها على قناة معينة والمعروفة أيضًا باسم حدّ المعلومات الأساسية غير الخطية لشانون [4]؛ تاركة مجالاً كبيراً حول أزمة السعة [5] ويبين الشكل (1) السعة لكل الألياف وسعة النظام لكل الألياف المنتشرة في أنظمة النقل التجاري [7]

.



الشكل (1–1): تطور سَعَة الإرسال في الألياف الضوئية[7] .

إنّ الأسباب الفنية الرئيسة هي عدم خطية الألياف في الألياف أحادية النمط القياسية (SSMF) كما يوضح الشكل (2–1) حيث (1) تتوافق مع حالة إرسال WDM مع ضجيج (ASE) ومرشحات بصرية (OFs) كل 100 كيلومتر ، ولا يوجد تعويض للتشتت في الخط. أما (2) هو حالة غير مادية حيث يهمل ASE ؛ إذ عند قدرة إشارة عالية (SNR أكبر من 30 ديسيبل) ، تكون السعة مماثلة (1) حيث يضمّن ASE أما الأخيران يتعلقان بالإرسال أحادي القناة الذي يتمتع كلاهما بقدرات أعلى من الأول؛ و هذا يؤدي إلى البحث عن طرق جديدة تسمح لنا بزيادة السعة بصورة كبيرة [13] .



الشكل (2–1): حد شانون غير الخطي ASE: انبعاث تلقائي مضخم ، OF: مرشح بصري[13] .

لذلك تشير التقديرات إلى أن الاتجاهات الحالية لنمو الحركة ستؤدي إلى أزمة السَّعَات في المستقبل القريب [6] ومن أجل زيادة سَعَة الألياف أو السَّعَة المكانية أُقتُرِح تعدد الإرسال بتقسيم المكان (SDM) حيث في أنظمة إرسال SDM ترسل إشارات مختلفة عدّة في وقت واحد من خلال توفير مسارات مكانية متعددة بطرق فاعلة من حيث التكلفة

- **بعض الدراسات السابقة :**

لقد ذكر البحث [43] كيفية توضع النوى في الألياف المتعددة النوى وكيفية الوصول الى علاقة التداخل المتبادل بين النوى والبحث [49]درس بنية الألياف متعددة النوى وكيفية حقن الإشارة ضمن الألياف متعددة النوى . أما البحث [46] بيَّن فوائد استخدام التجميع بتقسيم المكان في الألياف متعددة النوى من حيث زيادة السعة والكفاءة المكانية لشبكات مراكز البيانات. تحقيقاً لهذه الغاية ، قدَّم البحث نموذجًا تحليليًا للتداخل المتبادل بين النوى في مؤشر الخطوة العادي ثنائي الاتجاه واقترَح خططاً لتحديد الأولويات الأساسية التي تدرك XT بشكل صحيح.

أما البحث [54] فيصف الحالات التي يتم فيها استخدام تكنولوجيا الألياف متعددة النواة والشبكات الضوئية غير الفاعلة لحل مشكلة السعة أما البحث [58] فقد وصَّف الألياف متعددة النواة (MCF) التي تحتوي على سبعة نوى أحادية النمط مرتبة في مصفوفة سداسية، حيث أظهر تداخلًا منخفضاً بين النوى وخسارة منخفضة عبر نطاقي C و L.أما البحث [59] فقد حقق سعة إرسال 305 تيرابايت / ثانية على مدى 10 كم باستخدام 19 نواة بتوزع سداسي .

- **مشكلة البحث:**

تكمن مشكلة البحث الرئيسية في اقتراب الأنظمة الحالية بسرعة من الحدّ الأقصى لمقدار المعلومات التي يمكن إرسالها عبر قناة معينة؛ وهذا يؤدي إلى أزمة السَّعَة التي تلوح في الأفق.

- **هدف البحث:**

التغلب على حدود السعة في البنية التحتية لاتصالات الألياف البصرية الحالية

- **أهمية البحث:**

وجدنا من خلال دراسة مرجعية معمقة لأبحاث ودراسات اقتراب الأنظمة الحالية بسرعة من الحدّ الأقصى لمقدار المعلومات التي يمكن إرسالها عبر قناة معينة؛ وهذا يؤدي إلى أزمة السَّعَة التي تلوح في الأفق.

ومن أجل التغلب على حدود السّعة في البنية التحتية لاتصالات الألياف البصرية الحالية، فإن زيادة الكفاية المكانية باستعمال المقطع العرضي المتوفر من الألياف قد يكون إحدى الحلول الفعّالة.

لذلك تشكل الألياف متعددة النوى (MCF) في نطاق تعدد الإرسال بتقسيم المكان (SDM) حلاً واعداً لقضية الكفاية المذكورة أعلاه.

ومن ثم تكمن أهمية البحث؛ في كونه:

_ أظهرت النتائج وجود قيم أمثلية لنصف قطر النواة(a=2μm) والمسافة بين النوى(Λ= 26.5 μm) التي تعطي أقل قيمة للتداخل المتبادل بين النوى .

2 – يمكن عدّ الاستطاعة المرسلة 3dBm– قيمة أمثلية حيث تعطي قيمة جيدة لعامل الجودة، ومعدل خطأ البت عند الطول 50km .

3– بلغت قيمة التداخل المتبادل بين النوى في دراستنا 91 dB– بينما في المرجع [59] بلغت 42dB–وبالتالي نلاحظ وجود تحسين في تقليل قيمة التداخل المتبادل بين النوى.

4– وجود علاقة طردية بين التداخل المتبادل بين النوى المحيطة بالنواة المدروسة وعدد النوى المحيطة بتلك النواة

- **مسوغات البحث:**

من أهم المسوّغات التي تدفع لإجراء هذا البحث هي:

- اقتراب الأنظمة الحالية بسرعة من الحدّ الأقصى لمقدار المعلومات التي يمكن إرسالها عبر قناة معينة؛ وهذا يؤدي إلى أزمة السَّعَة التي تلوح في الأفق.
- إضافة دراسة تساعد علمياً وعملياً في حل مشاكل الازدحام في قناة الاتصال.
- المساهمة في وضع حلول جديدة لتحليل التداخل المتبادل بين النوى .

- **محددات البحث:**

تتضمن حدود البحث الأبعاد التي سيُجرى البحث ضمن نطاقها، وتشمل ثلاث نواحٍ وهي:

- الناحية البحثية ستُدرس علاقة التداخل المتبادل بين النوى بعناصرها (ثابت الانتشار ، نصف قطر الانحناء ، معامل اقتران النمط ، المسافة بين النوى ، طول الليف) ودراسة التشتت والتخامد للتصميم النهائي للنوى وايجاد منحني التداخل عند تغيير نصف قطر النوى
- الناحية المكانية لا يوجد مكان

- الناحية الزمانية لا يوجد حدود زمانية دقيقة لهذا لبحث، فهو يقدّم دراسة تحليلية تعتمد على نظريات ومفاهيم علمية سابقة، ومن ثمَّ يُعَدُّ البحث صالحاً لأيّ زمان، طالما لم يثبت مستقبلاً صحة لعكس النتائج التي تُوصِّلَ لها في الوقت الحالي.

➢ **منهج البحث ووادواته:**

تتضمن منهجية البحث الخطوات المتتابعة للقيام به للوصول إلى الهدف المرجو منه، وهي:

١. الاطلاع على الإطار النظري المتعلق بفروع البحث.

٢. مراجعة الأبحاث السابقة، واختيار دراسة مرجعية مناسبة.

٣. معايرة الدراسة المرجعية بمطابقة النتائج.

٤. إجراء الدراسة التحليلية البارامترية بواسطة تغيير البارامترات المطلوبة

٥. مناقشة النتائج.

٦. الاستنتاجات والتوصيات والأعمال المستقبلية.

يقدّم البحث دراسة تحليلية باستخدام البرامج الحاسوبية الآتية:

- برنامج Matlab من أجل دراسة بارامترات البحث
- برنامج Opti–system من أجل محاكاة الشبكة البصرية
- برنامج Comsol لبناء الليف

➢ **بنية الرسالة :**

يحتوي البحث على ثلاثة أجزاء رئيسية يندرج تحتها سبعة فصول على الشكل الآتي:

- **الجزء التمهيدي:**

يتألف من فصل واحد هو الفصل الأول (الإطار العام) ذُكر فيه مُقدِّمة عامة، ومشكلة البحث وتساؤلاته، وهدفه وأهميته ومبرراته ومحدوديته، ومنهجيته وأدواته.

- **الجزء الأول:**

يتألف من (الفصل الأول) : ويتضمن مفاهيم أساسية في الضوء و(الفصل الثاني): ويتضمن دراسة عن الألياف البصرية و (الفصل الثالث): ويتضمن تقانات التجميع في الألياف البصرية

- **الجزء الثاني:** يتألف من الفصل الرابع : ويتضمن مقدمة عن الألياف متعددة النوى ودراسة علاقة التداخل المتبادل بين النوى وكيفية حقن الاشارة في الألياف متعددة النوى
- **الخاتمة:**

تتألف من فصل واحد هو الفصل الخامس (خلاصة النتائج والاستنتاجات والتوصيات والأعمال المستقبلية) يحتوي خلاصة ما يقدمه هذا البحث من النتائج والاستنتاجات العامة والتوصيات الخاصة حول الحالة المدروسة، فضلاً عن اقتراح أعمالٍ ينطلق منها باحثون آخرون لإغناء البحث الحالي أو لتطويره.

الفصل الأول

مفاهيم أساسية في الضوء

Basic Concepts in Light

الفصل الأول: مفاهيم أساسية في الضوء

Basic Concepts in Light

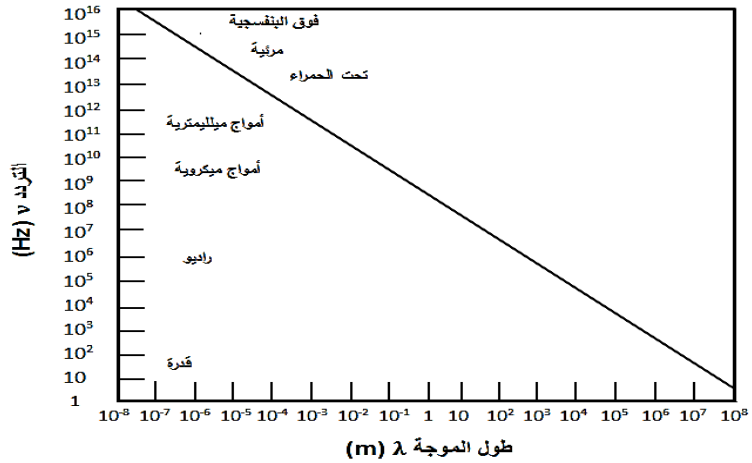
يتضمن هذا الفصل عرضاً للمفاهيم الأساسية التي لابد من إتقانها قبل الشروع في دراسة الألياف البصرية وتصميمها . إن المفاهيم المعروضة، هي: طبيعة الضوء الموجية والجسيمية والموجة الكهرطيسية، وسرعة الطور، وسرعة المجموعة، وفتحة النفوذ العددية، والانعراج والتشتت بشكله العام، والانعكاس عن حدود الفصل والزاوية الحرجة والاستقطاب.

1-1 طبيعة الضوء:

مع أن الضوء يعم وجود الإنسان؛ فإن طبيعته الأساسية تبقى على الأقل غامضة جزئياً. إننا نعرف كيف نقدر الظاهرة الضوئية وننشئ تنبؤات مستندة إلى هذه المعرفة، ونعرف كيف نستعمل ونتحكم بالضوء من أجل راحتنا الذاتية. لكن مازال الضوء يفسر غالباً بطرق مختلفة في شرح التجارب والملاحظات المختلفة. يسلك الضوء سلوك الموجة أحياناً، وسلوك الجسيم أحياناً أخرى [1].

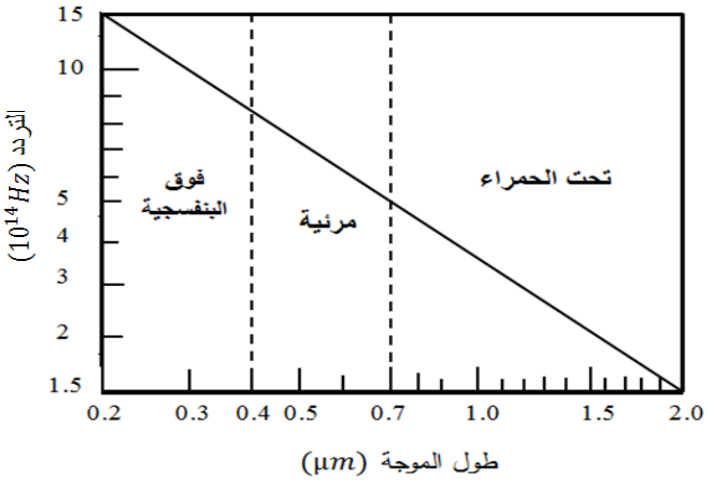
1-1-1 الطبيعة الموجية للضوء:

يمكن تفسير ظواهر ضوئية عدّة إذا أدركنا أن الضوء عبارة عن موجة كهرطيسية ذات تردد اهتزازي عالٍ جداً وطول موجة قصير جداً. يبين الشكل(1-1) الطيف الكهرطيسي، وطول الموجة في الخلاء، ومدى الترددات المختلفة. نستعمل مصطلح ضوئي؛ لنشير إلى الترددات في الأجزاء تحت الحمراء والمرئية وفوق البنفسجية من الطيف، وذلك لأن عدد من تقانات التحليل والأجهزة تستعمل جميعها في مدى هذه الترددات.



الشكل(1-1): الطيف الكهرومغناطيسي، يُظهر الأسماء المرتبطة بمناطق الترددات المختلفة[1] .

ومدى الترددات التي تهمنا يبينها الشكل(1−2). تمتد أطوال الموجة المرئية من $0.4\ \mu m$ (التي نميزها كلون أزرق) إلى $0.7\ \mu m$ (التي تظهر لنا كلون أحمر). إن الألياف الزجاجية ليست مرسلات جيدة للضوء في منطقة الرؤية حيث تخمد هذه الألياف الأمواج إلى الحد الذي تكون فيه فقط وصلات الإرسال القصيرة عملية. وتكون الخسارة أكبر في حال الموجات فوق البنفسجية. وفي مدى تحت الأحمر يوجد على أية حال منطقتان يكون فيهما الزجاج فاعلاً جداً. ويحدث هذا عند أطوال موجات قريبة من $0.85\ \mu m$ وفي المنطقة من $1.1\ \mu m$ إلى $1.6\ \mu m$ [2].



الشكل (1−2): جزء من الطيف الكهرطيسي، تفصل الخطوط الشاقولية المتقطعة المنطقة المرئية عن فوق البنفسجية وعن تحت الحمراء[2].

تتكون الموجة الكهرومغناطيسية من حقل كهربائي ومغناطيسي متعامدين ينتشران في الخلاء بسرعة الضوء c. أما في الأوساط الصلبة تختلف سرعة الموجة، وتعتمد قيمتها على المادة، والشكل الهندسي لأي بنية موجهة للموجة قد تكون موجودة. يعطى طول موجة ضوئية λ_n بالعلاقة[3,4]:

$$\lambda_n = \frac{\vartheta}{\nu} \qquad (1-1)$$

حيث: ϑ سرعة الموجة في المادة، ν ترددها.

يحدد التردد بوساطة المنبع المشع، ولا يتغير عندما ينتقل الضوء من مادة إلى أخرى. وبموجب العلاقة (1−1)؛ فإن اختلاف السرعة يسبب تغيراً في طول الموجة.

تستعمل الطبيعة الموجية للضوء في تحديد كيفية انتشار الأمواج الضوئية عبر وسائط النقل، ويظهر مثل هذا التحليل الشروط الضرورية للضوء الذي سيوجَّه ، كما وتبين أيضا السرعة التي تنتشر بها الأمواج.

1-1-2 الطبيعة الجسيمية للضوء:

لقد وصفنا الضوء كموجة إلا أنه أحياناً لا يسلك الضوء هذا السلوك؛ وإنما يسلك سلوكاً كما لو كان مكوناً من حبيبات صغيرة جداً تدعى الفوتونات [5]. وتعطى طاقة الفوتون الواحد بالعلاقة :

$$W = h\nu \qquad (2-1)$$

حيث h ثابت بلانك ويساوي $6.626 \times 10^{-34} J.s$ ، وتقدر الطاقة المحددة بالمعادلة (1-2) بوحدة الجول (J). وتقاس الطاقة أيضاً بوحدة الإلكترون فولط (eV)، وهي الطاقة الحركية التي يكتسبها إلكترون واحد عندما يسرّع بوساطة فرق كمون مقداره واحد فولط. وتحدد العلاقة بين الإلكترون فولط والجول كمايأتي :

$$1\ eV = 1.6\ \times\ 10^{-19} J$$

توضح نظرية الجسيم كيفية توليد الضوء في المنابع مثل الثنائيات الباعثة للضوء والليزرات والثنائيات الليزرية، وتشرح أيضاً كيفية كشف الضوء عن طريق تحويل الإشعاع الضوئي إلى تيار كهربائي [6].

1-2 الأمواج الكهرطيسية Electromagnetic Waves:

يسبب انتشار الاهتزازات الميكانيكية في الأوساط المادية حدوث أمواج ميكانيكية كما في الصوت. كذلك يسبب انتشار الاهتزازات الضوئية في الخلاء والأوساط المادية حدوث الأمواج الكهرطيسية كما في الضوء. لذلك نمثل هذه الحركات الاهتزازية بتابع الجيب أو التجيب. ولابد لنا من توضيح المفاهيم الآتية:

1-2-1 الأمواج في بُعد واحد:

أولا – الموجة الجيبية:

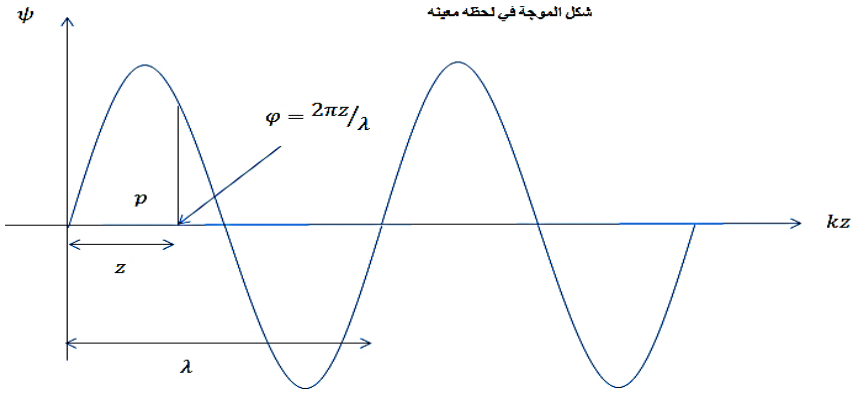
إذا افترضنا نقطة معينة، ولحظنا شكل الموجة عند مرورها منها، نجد أن الموجة تكرر نفسها في الفراغ بزمن ثابت ــ يدعى الدور (T) ــ بعد مسافة λ تدعى طول الموجة، ويسمى معكوسهُ $1/\lambda$ العدد الموجي. تملك هذه الموجة السعة والتردد نفسه في جميع النقاط، لكن طورها يتغير من نقطة لأخرى على طول الموجة. يبين الشكل (2-3) موجة تتحرك من اليسار الى اليمين (الاتجاه الموجب لـ z)، فتهز جسيماً في المبدأ؛ وفق المعادلة [3,7]:

$$\psi_0 = \psi_m\ sin\,\omega t \qquad (3-1)$$

حيث ψ_m سَعَة الاهتزاز. أما في النقطة p التي تقع على بعد z من المبدأ وإلى اليمين، تكون معادلة الانزياح على الشكل الآتي:

$$\psi_p = \psi_m\ sin(\omega t - \varphi) \qquad (4-1)$$

نلحظ أن النقطة التي تبعد بمقدار λ عن المبدأ لها طور يختلف بمقدار 2πعن الطور في المبدأ، لذلك فإن الطور في النقطة p (التي تبعد مسافة z عن المبدأ) يعطى بالعلاقة: $\varphi = \frac{2\pi}{\lambda} z = kz$.



الشكل (1– 3): شكل الموجة في لحظة معينة[3,7].

تصبح معادلة الانزياح :

$$\psi_p = \psi_m \, sin(\omega t - kz) \qquad (5-1)$$

فإذا أخذنا حالتي الانتشار (نحو اليمين واليسار ــ موجة واردة وموجة منعكسة)، يكون في الحالة العامة:

$$\psi = \psi_m \, sin(\omega t \pm kz) \qquad (6-1)$$

حيث ψ_m السعة العظمى، و$\omega = 2\pi\nu \; rad/s$ التردد الزاوي، وν التردد بالهرتز (Hz)، والحد k ثابت الانتشار في المادة ، ويعطى بالعلاقة :

$$k = \frac{\omega}{\vartheta} \qquad (7-1)$$

حيث ϑ سرعة الموجة في الوسط. وبافتراض قرينة الانكسار n تكون السرعة $\vartheta = c/n$ ،وهكذا يكون :

$$k = \frac{\omega n}{c} \qquad (8-1)$$

يرمز لثابت الانتشار في الخلاء بـ k_0 ، و منه $n = 1$ في الخلاء، ويكون:

$$k_0 = \frac{\omega}{c} \qquad (9-1)$$

وبضم المعادلتين السابقتين يمكن أن يُعطى ثابت الانتشار في أي وسط ؛ بدلالة قيمة ثابت الانتشار في الخلاء كما يأتي :

$$k = k_0 n \qquad (10-1)$$

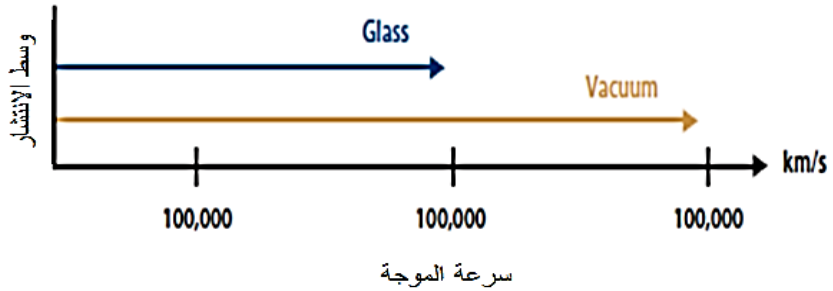
وبحسب العلاقة $\lambda_n = \vartheta/\nu$، وبالتبديل في المعادلة $(8-1)$ ينتج :

$$k = \frac{2\pi}{\lambda_n} \qquad (11-1)$$

تربط هذه المعادلة ثابت الانتشار في وسط ما بطول الموجة في ذلك الوسط. إن طول الموجة في الخلاء هو $\lambda = c/\nu$ ، وطول الموجة في أي وسط هو $\lambda_n = \vartheta/\nu$ ، ومنه:

$$\frac{\lambda}{\lambda_n} = \frac{c}{\vartheta} = n \qquad (12-1)$$

إنّ طول الموجة في وسط ما أقصر من طول الموجة في الخلاء؛ لأن قرينة الانكسار أكبر من الواحد؛ وهذا يوافق سرعة انتشار أقل في الوسط ؛ مقارنة بالخلاء كما يوضح الشكل(2-4).



الشكل (1-4): يوضح تغير سرعة الموجة بتغير وسط الانتشار[8,9].

ثانياً- سرعة الطور:

الأمواج المستوية المنتشرة ؛ وفق z تكون المستويات (z = const) ذوات أطوار ثابتة ، وتنتشر بسرعة ثابتة ندعوها سرعة الطور. لذلك من المعادلة:

$$E_x(z,t) = E_{ox}\, sin(\omega t - k\, z) \qquad (13-1)$$

نكتب:

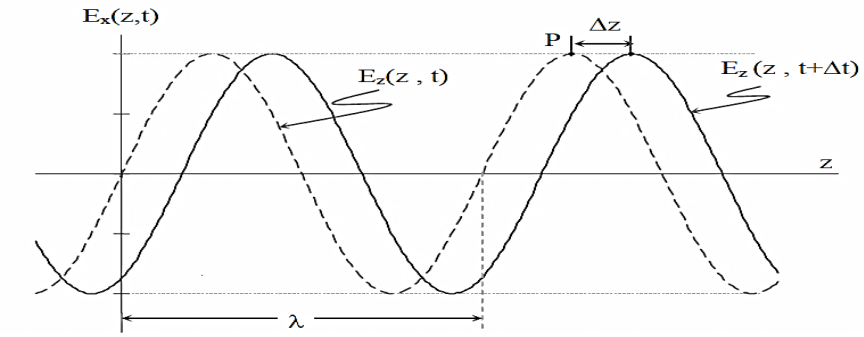
$$\omega t - kz = const \qquad (14-1)$$

$$=> \omega dt - k\, dz = 0 \;\; =>$$

$$\frac{dz}{dt} = \frac{\omega}{k} = \vartheta_p = \frac{1}{\sqrt{\mu\varepsilon}} \qquad (15-1)$$

يوضح الشكل (2-5) تمثيل الحقل الكهربائي كتابع للموضع عند زمنين مختلفين باستعمال العلاقة (1-13)، نلاحظ أن النقطة p الواقعة على قمة المنحني في الفراغ قد تحركت إلى اليمين مسافة Δz في زمن Δt . ومن ثم فإنه لبقاء النقطة p في القمة يجب عليها أن تتحرك بسرعة $\frac{\Delta z}{\Delta t}$ ، أو أن تكون سرعتها الآنية مساوية:

$$\vartheta_p = \lim_{\Delta t \to 0} \frac{\Delta z}{\Delta t} = \frac{dz}{dt} \qquad (16-1)$$



الشكل (1-5): الحقل الكهربائي في الفراغ (النقطة z) عند زمنين مختلفين t و $t + \Delta t$ [8,9].

أي إن سرعة الطور هي سرعة رياضية تمثل سرعة انتقال قيمة معينة للطور من مكان لآخر، وتنتج عن معدل تغير طور الحقل الكهربائي [8,9].

1-2-2 الأمواج الكهرطيسية في الفراغ:

درسنا في الفقرة السابقة الموجة ببعد واحد، الآن ومن أجل الموجة التي تنتشر في الفراغ ثلاثي الأبعاد (x,y,z) نأخذ الخلاء الذي هو عبارة عن وسط لا يحوي شحنات ولا تيارات كهربائية أي $\rho = 0, \sigma = 0$ و $\varepsilon = \varepsilon_0, \mu = \mu_0$. كما نعلم أن الموجة الكهرطيسية تتكون من حقلين كهربائي ومغناطيسي متعامدين ومعامدين لمنحى الانتشار. لذلك تأخذ معادلات مكسويل للموجة الكهرطيسية في الخلاء الشكل الخاص الآتي :[7]

$$\vec{\nabla}.\vec{E} = 0 \qquad (a-17-1)$$

$$\vec{\nabla} \wedge \vec{E} = -\mu_0 \frac{\partial \vec{H}}{\partial t} \qquad (b-17-1)$$

$$\vec{\nabla}.\vec{H} = 0 \qquad (c-17-1)$$

$$\vec{\nabla} \wedge \vec{H} = \varepsilon_0 \frac{\partial \vec{E}}{\partial t} \qquad (d-17-1)$$

المعادلة الموجية لـ $\vec{E}$ و $\vec{H}$:

للحصول على المعادلة الموجية للحقل الكهربائي نأخذ دوار المعادلة (1-17-b)، فيكون:

$$\vec{\nabla} \wedge (\vec{\nabla} \wedge \vec{E}) = \vec{\nabla}(\vec{\nabla}.\vec{E}) - \nabla^2\vec{E} = \vec{\nabla} \wedge \left(-\mu_0 \frac{\partial \vec{H}}{\partial t}\right)$$

$$= -\mu_0 \frac{\partial}{\partial t}(\vec{\nabla} \wedge \vec{H}) = -\mu_0 \varepsilon_0 \frac{\partial^2 \vec{E}}{\partial t^2}$$

ومن أجل الحقل المغناطيسي. من المعادلة (1-17-d):

$$\vec{\nabla} \wedge (\vec{\nabla} \wedge \vec{H}) = \vec{\nabla}(\vec{\nabla}.\vec{H}) - \nabla^2\vec{H} = \vec{\nabla} \wedge \left(\varepsilon_0 \frac{\partial \vec{E}}{\partial t}\right)$$

$$= \varepsilon_0 \frac{\partial}{\partial t}(\vec{\nabla} \wedge \vec{E}) = -\mu_0 \varepsilon_0 \frac{\partial^2 \vec{H}}{\partial t^2}$$

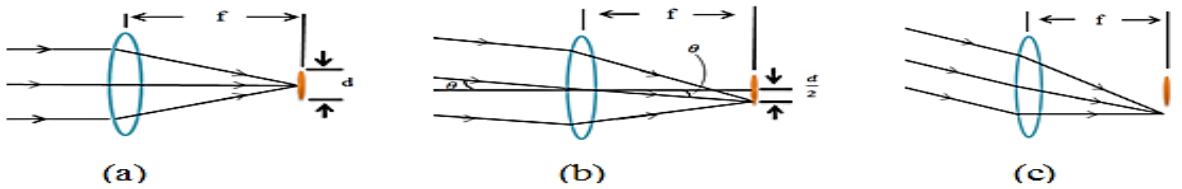
فنحصل على المعادلة الموجية للحقلين الكهربائي والمغناطيسي في الفراغ ثلاثي الأبعاد [7]:

$$\nabla^2\vec{E} = \mu_0 \varepsilon_0 \frac{\partial^2 \vec{E}}{\partial t^2} \qquad (18-1)$$

$$\nabla^2\vec{H} = \mu_0 \varepsilon_0 \frac{\partial^2 \vec{H}}{\partial t^2} \qquad (19-1)$$

1-3 فتحة النفوذ العددية Numerical Aperture:

يتمتع النظام البصري بميزة مهمة جداً، وهي قابليته لتجميع الضوء الوارد ضمن مدى كبير من الزوايا. يبين الشكل (1-6) مستقبلاً ضوئياً (بصرياً) مؤلفاً من عدسة ومكشاف ضوئي. إن سطح العدسة أكبر بكثير من سطح المكشاف، فهي بذلك تعترض أشعة أكثر مما يفعله المكشاف ذاته، حيث تجمع العدسة هذا الضوء على المكشاف. ويكوّن كلاً من العدسة والمكشاف معاً نظام تجميع فاعل . يسهل تحديد الموقع على المكشاف حيث يتركز الضوء وذلك برسم الشعاع. نمدد الشعاع الوارد الذي يمر في مركز العدسة حتى يلاقي المكشاف كما هو موضح في الشكل. من الشكل(1-6) يبدو واضحاً أنّ الأشعة الواردة ضمن زوايا كبيرة لن تلاقي المكشاف؛ ومن ثم ستضيع [2].



الشكل (1−6): مستقبل بصري بمكشاف ضوئي موضوع في المستوي البؤري للعدسة. (a): يرد الضوء موازيا لمحور العدسة، (b): تكون الأشعة الواردة عند الزاوية القصوى للاستقبال (زاوية القبول)، (c): تكون الأشعة خارج حدود زاوية قبول النظام[2].

بالاعتماد على الشكل (1−6) تحدد زاوية القبول العظمى؛ وفق العلاقة الآتية:

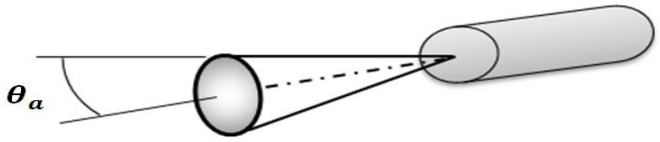
$$\tan\theta = \frac{d}{2f} \qquad (20-1)$$

حيث d قطر سطح المكشاف الضوئي الدائري، و f البعد البؤري للعدسة. وبسبب التناظر الدائري للمستقبل سيكشف المستقبل الضوء الوارد ضمن مخروط نصف زاويته θ . فتُحدد فتحة النفوذ العددية كما يأتي :[2,10,11,12]

$$N_A = n_0 \sin\theta \qquad (21-1)$$

حيث n_0 قرينة الانكسار للمادة بين العدسة والمكشاف الضوئي والتي هي في حالتنا الهواء، و θ زاوية القبول العظمى، ونرمز لها بـ θ_a. فمن أجل المستقبل في الشكل (1−6) تعطى θ_a بالعلاقة(1−20).

إن تحديد فتحة النفوذ العددية المعطاة في المعادلة (1−21) ينطبق على جميع أنظمة تجميع الضوء بما فيها الألياف البصرية، ويظهر على الشكل (1−7) مخروط التجميع من أجل ليف ما. إن الأشعة التي ترد بزوايا تقع خارج هذا المخروط لن تنتشر في الليف بل ستتخامد بسرعة.



الشكل (1−7): استقبال الليف الأشعة الضوئية الواردة ضمن زاوية قبول الليف θa.

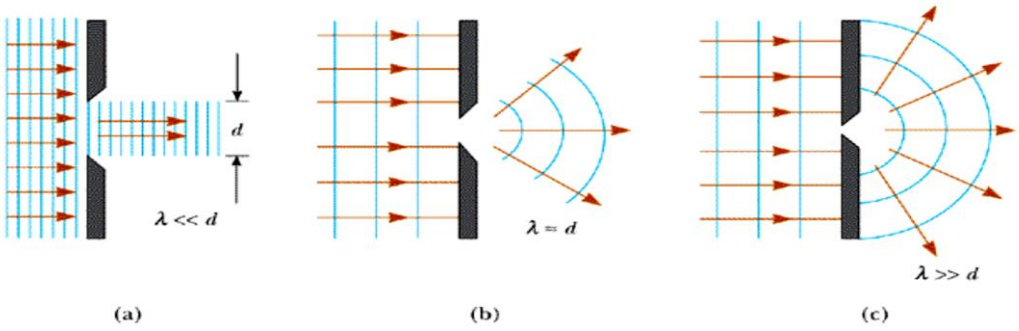
تقاس فتحة النفوذ العددية عادة بوجود الهواء أمام الليف بوضع $n_0 = 1$ في المعادلة(1−21)، فيكون:

$$N_A = \sin\theta_a \qquad (22-1)$$

نعرف من الشكل(1−7) مخروط القبول بالزاوية $2\theta_a$.

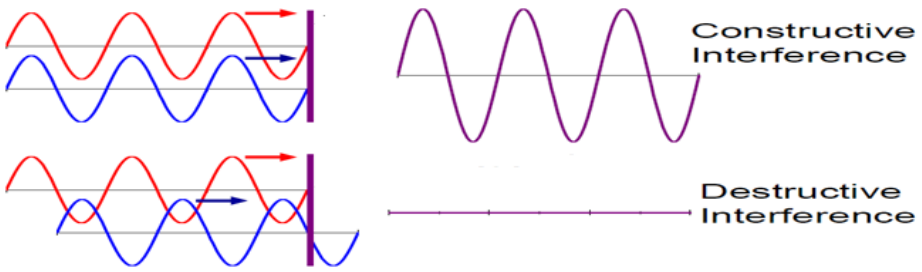
4-1 الانعراج Diffraction:

يعرف الانعراج بأنه حيود الضوء عن مبدأ الانتشار المستقيم، والذي ينص على أن الضوء يصدر عن المنابع الضوئية ، ويتابع سيره دون حيود. يبين الشكل(1-8) ورود موجة مستوية على فتحة، فتدل تجربتنا اليومية على أنه إذا عبرت موجة مستوية (أشعة متوازية) من خلال فتحة دائرية موضوعة في حاجز عاتم، وكان قطرها كبيراً؛ مقارنة مع طول موجة الضوء المستعمل؛ فإنه يمكن عد الأشعة البارزة منها متوازية. وإذا كان قطر الفتحة قريباً من طول الموجة، فإن الضوء البارز سوف يتوزع في جميع الاتجاهات (ينتشر بزوايا مختلفة)، ونقول إن الضوء قد انعرج وحاد عن مبدأ الانتشار المستقيم، وتكون الموجة البارزة كروية. أما إذا كان قطر الفتحة أصغر بكثير من طول الموجة، فإنها تصبح في هذه الحالة منبعاً نقطياً للضوء [3].



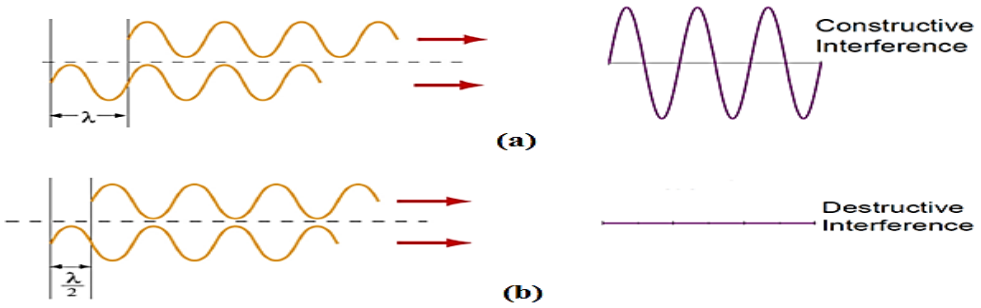
الشكل(1-8): ورود موجة مستوية(حزمة أشعة متوازية) على فتحة. (a) قطر الفتحة أكبر بكثير من الطول الموجي، (b) قطر الفتحة مساوٍ تقريبا لطول الموجة، (c) قطر الفتحة أصغر بكثير من الطول الموجي[3] .

يسبب انعراج الضوء بزوايا مختلفة فرقاً في المسير الضوئي للأمواج، ومن ثم يولد فرق في الطور، ويؤدي إلى حدوث تداخل بناء وهدام للضوء مع نفسه كما يوضح الشكل (1-9):



الشكل(1-9): التداخل البناء والهدام[3].

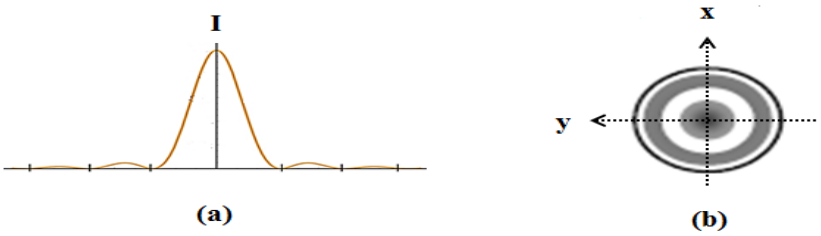
يبين الشكل (1-10) أنه عندما يحقق فرق المسير الضوئي δ بين الموجات العلاقة: $\delta = m\lambda$ يحدث تداخل بناء، أما عندما يحقق فرق المسير الضوئي العلاقة: $\delta = (m + \frac{1}{2})\lambda$ فإنه يحدث تداخل هدام. حيث: $m = 0, \pm1, \pm2, \pm3 \ldots$.



الشكل (1−10): فرق المسير الضوئي بين موجتين. (a) تداخل بناء، (b) تداخل هدام[3].

وبصيغة أخرى يكون التداخل بناء عندما يكون فرق الطور: $\varphi = 0, \pm 2\pi, \pm 4\pi, \ldots$، وهدام عندما يكون فرق الطور: $\varphi = \pm\pi, \pm 3\pi, \ldots$.

فمن أجل الفتحات التي يكون فيها $d \approx \lambda$ حيث d قطر الفتحة: إذا وضعنا شاشة خلف الحاجز، فإننا سوف نشاهد منطقة دائرية مضيئة ،تداخل بنّاء، مُحاطة بحلقات مظلمة ،تداخل هدام، فمضيئة ومتعاقبة ندعوها أهداب الانعراج كما في الشكل (1−11) [3,10,12].



الشكل(1−11): أهداب الانعراج. (a): شدة أهداب الانعراج، (b): تمثيل شدة أهداب الانعراج في مستوٍ عرضي[3,10,12].

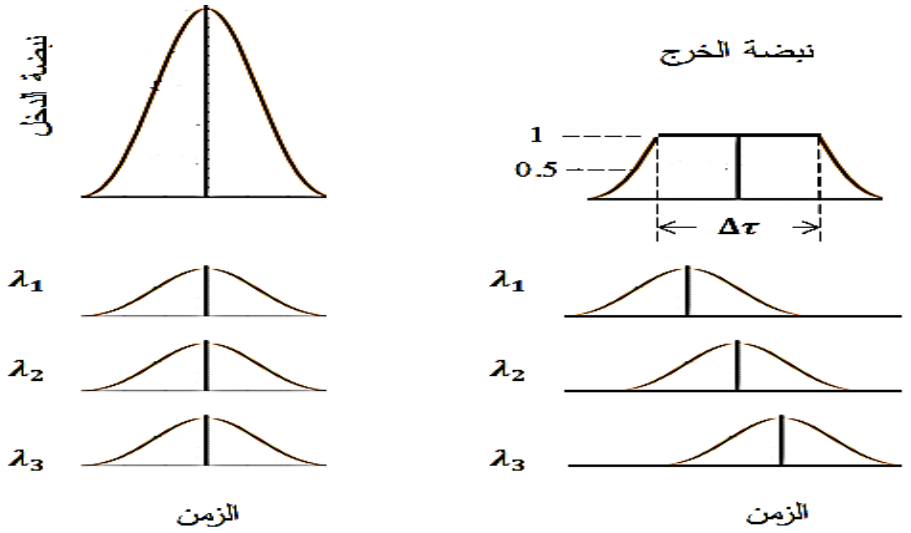
لذلك فإن ظاهرة الانعراج هي التي تسود في الحالات التي تكون فيها الفتحات صغيرة ؛ مقارنة بالطول الموجي، أي كلما اقتربت النسبة d/λ من الصفر تغلبت ظاهرة الانعراج على مبدأ الانتشار المستقيم.

1−5 تشتت المادة وتشوه النبضة. Material Dispersion and Pulse Distortion:

ترتبط سرعة الموجة مع قرينة الانكسار بالمعادلة $\vartheta = c/n$، لكن قرينة الانكسار تتغير بتغير طول الموجة. كما في الزجاج المستعمل في الألياف البصرية. لذلك تتغير سرعة الموجة أيضاً مع تغير طولها. تطلق كلمة ـ تشتت ـ على خاصية تغير السرعة مع تغير طول الموجة. فعندما يكون تغير السرعة ناتجاً عن خواص المادة تدعى النتيجة تشتت المادة.

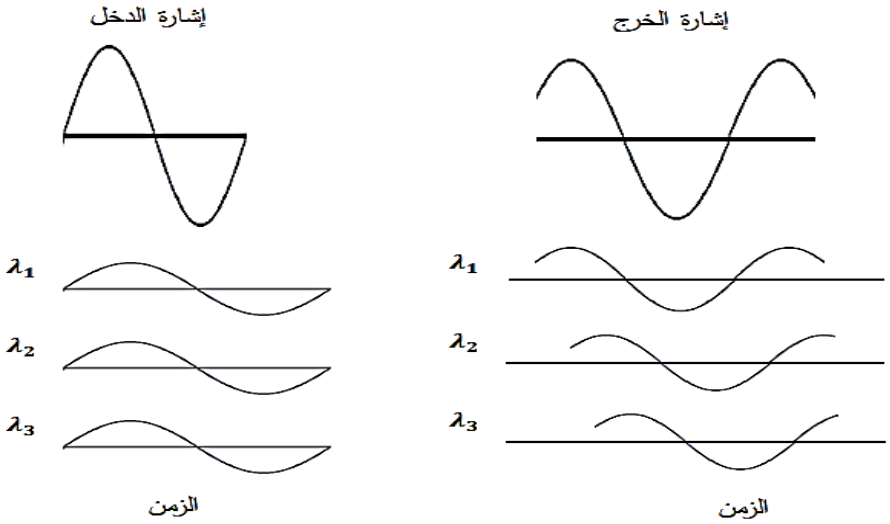
لنفترض ماذا يحدث عندما يبث منبع حقيقي نبضة ضوء في ليف زجاجي مشتت. يتألف قطار النبضات البدائية من مجموعة من النبضات المتماثلة ما عدا في أطوال موجاتها، وهذا ما يوضحه الشكل(1−12) من أجل بعض أطوال الموجة لمنبع. تنتشر النبضات المتعددة بسرعات مختلفة، وتصل نهاية الليف بأوقات متفاوتة

بصورة ضئيلة. وعندما تتلاقى عند المخرج ، فإنها تجمع معاً، وتعطي خرجاً مطولاً بالنسبة لإشارة الدخل. ممّا يوضح كيف يخلق التشتت تشوهاً للنبضة. وكلما ابتعد مسير النبضة ازداد الاتساع.



الشكل (1–12): اتّساع النبضة الذي يسببه الانتشار خلال وسط مشتت.

يؤدي التشتت أيضاً إلى تشوه الإشارة التماثلية. يبين الشكل (1–13) موجة تماثلية منتشرة بثلاثة أطوال موجية مختلفة. وبعد انتشارها خلال الوسط المشتت تضاف أطوال الموجة الثلاثة إلى بعضها، ويكون تغير اتّساع الإشارة المستقبلة أقل من تغير اتّساع إشارة الدخل.

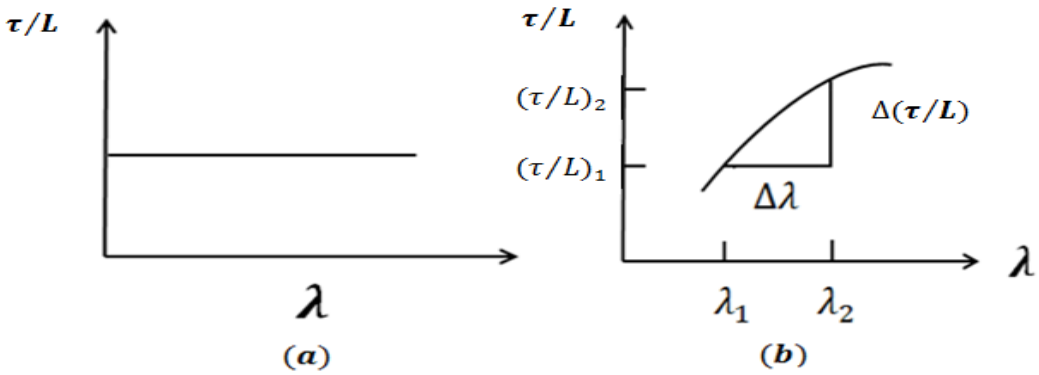


الشكل(1–13): يسبب التشتت خسارة في اتساع إشارة تماثلية.

يمكن إنقاص التشوه الذي يسببه تشتت المادة؛ باستعمال منابع ذات حزم أضيق؛ أي باستعمال منابع أكثر ترابطاً. وبهذا الخصوص يتميز ثنائي الليزر LD عن ثنائي LED. كما يمكن مبدئياً إنقاص التشوه الناتج عن

التشتت بترشيح الحزمة الضوئية عند المرسل والمستقبل ؛ وهذا يسمح فقط لحزمة ضيقة جداً من أطوال الموجة أن تصل إلى الكاشف الضوئي. تعاني هذه التقانة من عائقين: لا يمكن بناء المرشحات بحزم تمرير ضيقة بما فيه الكفاية لكي تكون فاعلة ، وستنقص المرشحات ذات الحزمة الضيقة بصورة كبيرة القدرة البصرية ؛ نتيجة إزالة الضوء عند أطوال الموجة غير المرغوبة . الآن وقد حددنا نوعياً كيف يشوه التشتت الإشارات المرسلة خلال الزجاج يجب أن نجد مقدار زيادة العرض (الاتّساع) للنبضة المحدثة [2].

ليكن τ الزمن اللازم كي تقطع نبضة مساراً طوله L . يبين الشكل (1−14) رسماً بيانياً لكل وحدة طول (τ/L) كتابع لطول الموجة. لدينا في الشكل (a−14−1) منحنٍ من أجل وسط غير مشتت حيث لا يعتمد زمن الانتشار على طول الموجة. أما في الشكل (b−14−1) يعتمد زمن الانتشار على طول الموجة كما هو ملائم من أجل مادة مشتتة. لنفترض الآن نبضة لها أقصر وأطول طولي موجة λ_2, λ_1. وسنحدد اتّساع هذه النبضة.



الشكل(1−14): زمن الانتشار لكل وحدة طول. (a) وسط غير مشتت . (b) وسط مشتت[2].

يمكن أن نعد أن طولي الموجة هما حافتا حزمة يبثها منبع ما. وبكلمات أخرى يمكن أن ندعُو

$\Delta\lambda = \lambda_2 - \lambda_1$. حيث $\Delta\lambda$ هو العرض الطيفي للمنبع.

ستصل جميع أطوال الموجة الواقعة بين بعد طول الموجة الأسرع من بين طولي الموجتين هاتين وقبل الأبطأ بينهما. إن زمن الانتشار لكل واحدة طول لا يهمنا مباشرة، لكن الكمية المهمة هي الفرق في زمن الانتشار لكل واحدة طول لكلا طولي الموجتين الحديتين. نشير إلى هذه الكمية بالرمز $\Delta(\tau/L)$. عندئذ:

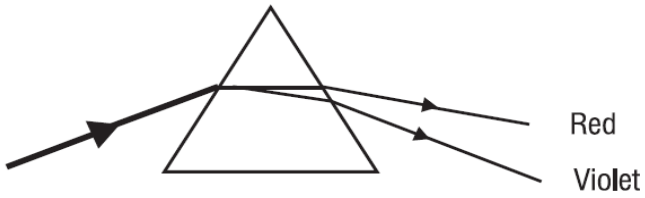
$$\Delta(\tau/L) = (\tau/L)_2 - (\tau/L)_1 \qquad (23-1)$$

حيث $(\tau/L)_1$ و $(\tau/L)_2$ هما القيمتان المطابقتان لكل من λ_1 و λ_2 على التتالي. والحد $\Delta(\tau/L)$ هو توسع النبضة لواحدة الطول، وغالباً ما يدعى من أجل السهولة اتّساع النبضة. لذلك يكون اتّساع النبضة الفعلي:

$$\Delta\tau = \tau_2 - \tau_1 \qquad (24-1)$$

تشتت المادة في الزجاج:

يمكن ملاحظة التشتت في الزجاج بسهولة عندما يفرّق موشور زجاجي الضوء الأبيض إلى ألوانه الأساسية كما في الشكل (1−15). توضح هذه التجربة اعتماداً على تابعية قرينة انكسار الزجاج لطول الموجة. وبموجب قانون سنل ديكارت تنحرف الأشعة الضوئية الواردة، فتنحرف الألوان المختلفة بزوايا مختلفة؛ لأن قرينة الانكسار مختلفة لكل لون [2،13].

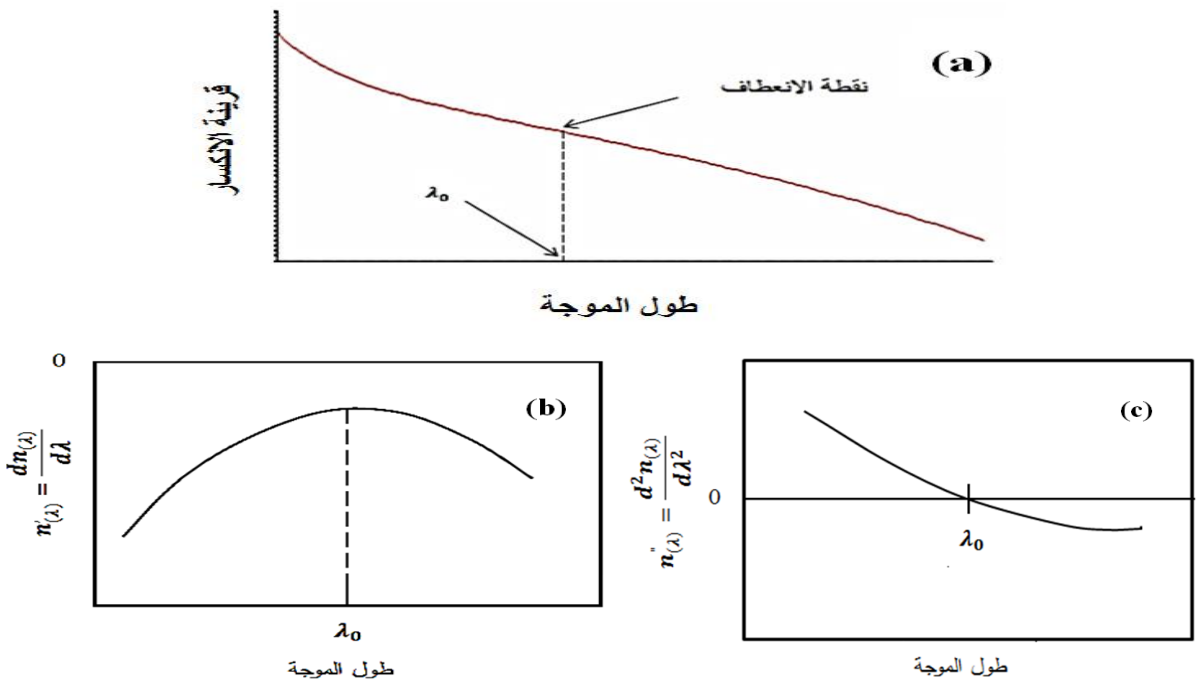


الشكل(1−15): تشتت الضوء الأبيض عند سقوطه على موشور.

إن قرينة الانكسار لزجاج ثاني أوكسيد السيليكون النقي (SiO_2) المستعمل في الألياف البصرية تعتمد على طول الموجة مبينة في الشكل (1−16). هناك عدة خواص جديرة بالاهتمام هي أن قرينة الانكسار تتناقص بتزايد طول الموجة، فيكون ميل المنحني في الشكل (1−16−a) سالباً. ويتغير مقدار هذا الميل بتغير طول الموجة، وعند طول موجة محدد (λ_0 في الشكل) يوجد نقطة انعطاف على منحني قرينة الانكسار. ويكون مقدار الميل بالقيمة الدنيا عند طول الموجة هذا كما يشير إليه الشكل(1−16−b) وبسبب هذا يكون ميل المنحني (b) صفراً عند λ_0 . يظهر ميل المنحني (b) على الشكل (1−16−c). يمثل هذا الشكل المشتق الثاني لقرينة الانكسار بالنسبة لطول الموجة . إن قرينة الانكسار من أجل السيليكا النقية يقارب 1.45 وإن نقطة الانعطاف تقع بقرب 1.3 µm. تؤدي إشابة (SiO_2) بكمية صغيرة من مواد أخرى مثل أوكسيد الجرمانيوم (GeO_2) إلى إزاحة طفيفة لمنحنيات قرينة الانكسار[2,14]. لذلك نعرف معادلة سيليمر التي تعطينا قرينة الانكسار الموافقة لكل طول موجي ينتقل عبر المادة؛ وفق العلاقة [15,16] الآتية:

$$n(\lambda) = \sqrt{1 + \sum_{i=1}^{3} A_i \cdot \frac{\lambda^2}{\lambda^2 - \lambda_i^2}} \qquad (25-1)$$

يبين الشكل (1−16−a) اعتماد قرينة الانكسار لمادة السيليكا على طول الموجة.



الشكل(1−16): (a)اعتماد قرينة الانكسار لزجاج (SiO_2) على طول الموجة.(b) اشتقاق (ميل) المنحني في الجزء a. (c) اشتقاق (ميل) المنحني في الجزء b [15,16].

بينما يظهر الشكل(1−16−b) أن ميل المنحني τ/L الذي يرمز له بالرمز $(\tau/L)'$ ، هو:

$$(\tau/L)' = \frac{\Delta(\tau/L)}{\Delta\lambda} \qquad (26-1)$$

أو:

$$\Delta(\tau/L) = (\tau/L)'\,\Delta\lambda \qquad (27-1)$$

وتبين التحليلات أن:

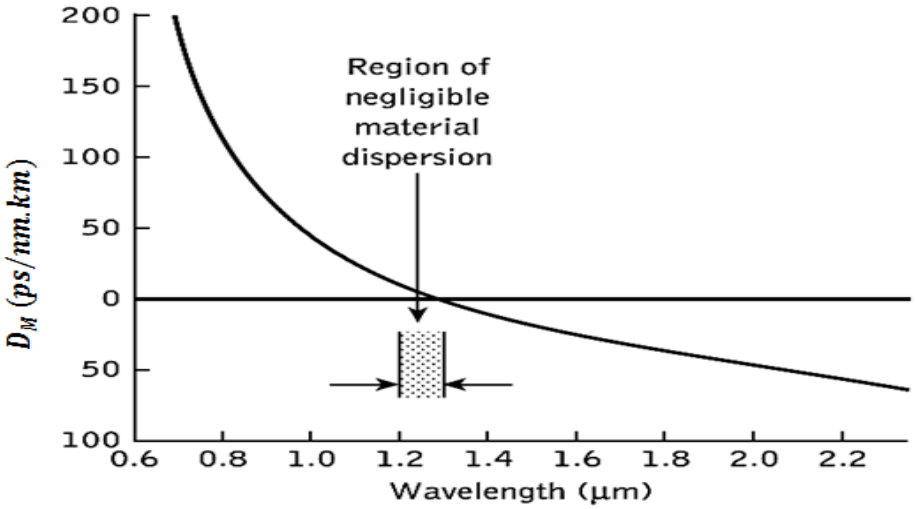
$$(\tau/L)' = -\frac{\lambda}{c}\frac{d^2n}{d\lambda^2} = -\frac{\lambda}{c}n''(\lambda) \qquad (28-1)$$

يمكن أن نتصور هذا الحدّ بالنظر إلى الشكل(1−16−c) حيث يظهر مخطط $n''(\lambda)$. وبضم المعادلتين الأخيرتين ينتج $\Delta(\tau/L) = -\lambda.n''(\lambda).\Delta\lambda/c$. وهذا يظهر مدى اعتماد اتّساع النبضة على سلوك قرينة الانكسار. من المناسب أن نعرّف معامل تشتت المادة كما يلي: $D_M = \lambda.n''(\lambda)/c$. يمكن حينئذ أن نكتب اتّساع النبضة لكل وحدة طول كمايأتي:

$$\Delta(\tau/L) = -\frac{\lambda}{c}.n''(\lambda).\Delta\lambda = -D_M\Delta\lambda \qquad (29-1)$$

يبين الشكل(1−17) مخطط تشتت المادة من أجل السيليكا النقية. يبدو أن رسم D_M مشابه تماماً للشكل

(c−16−1)، لأن D_M تتناسب مع $n''(\lambda)$. إن وحدة قياس D_M هي $ps/nm.km$ (تقرأ كمقدار اتّساع النبضة بالبيكوثانية لكل نانومتر من العرض الطيفي للمنبع لكل كيلومتر من طول المسار). وتُفسر الإشارة السالبة في المعادلة (1−29) حيث $\Delta\lambda$ موجب دوماً كمايأتي: يبدو من هذه المعادلة أن اتّساع النبضة سالباً عندما تكون D_M موجبة. وهذا يعني أن $(\tau/L)_1 > (\tau/L)_2$؛ أي إن زمن المسير لأطوال الموجة الأقصر λ_1 أطول من زمن المسير لأطوال الموجة الأطول λ_2. إن طول الموجة الأطول يعني انتشاراً أسرع. وهذا ما يبينه الشكل (1−17) من أجل السيليكا النقية عند أطوال موجة تقع دون 1.3 µm حيث تكون D_M موجبة. أما عندما تكون D_M سالبة يكون اتّساع النبضة موجباً، وتنتشر الموجة ذات الطول الأقصر بصورة أسرع (يكون زمن مسيرها أقل) من الموجة ذات طول الموجة الأطول، هذه هي الحال من أجل السيليكا النقية عند أطوال موجة فوق1.3µm [2,17].



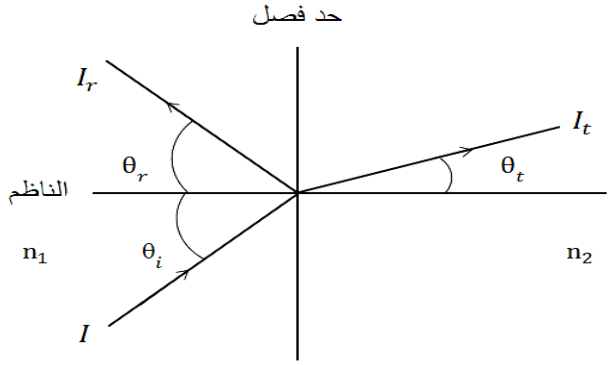
الشكل (1−17): تشتت المادة للسليكا النقية [22].

نستنتج مما سبق أنه عند 1.3 µm يكون تشتت المادة صفراً للسليكا النقية. ويختفي اتّساع النبضة الناتج عن تشتت المادة عند طول الموجة هذا. إن الزجاجيات المستعملة في بصريات الليف والتي أساسها السليكا ذات تشتت مادة معدوم (صفر) عند طول موجة بقرب 1.3 µm. إن الإشابة (وهو إضافة كميات صغيرة من مواد أخرى إلى السليكا) يمكن أن يغير طول الموجة ذات التشتت الصفري بحوالي 0.1 µm .

1−6 الانعكاس عند حدود الفصل .Reflection at the Boundary:

لفهم آلية انتشار الضوء في الليف، لابد لنا أن نعرّج على بعض مفاهيم الضوء الهندسي التي تنص على أن الضوء ينتشر وفق مسار مستقيم ما لم يحدث تغير في وسط الانتشار، وأن كل شعاع ضوئي من الحزمة الضوئية لا يتأثر في انتشاره أو انعكاسه، ولا في انكساره بما يحدث للأشعة الأخرى. وسنبين ذلك في الدراسة الآتية:

بينت التجارب أنه عند سقوط شعاع ضوئي I وحيد اللون على سطح يفصل بين وسطين شفافين قرينة انكسارهما n_1 و n_2 فإن الشعاع الوارد ينقسم إلى قسمين، أحدهما ينعكس في مستوي الورود يسمى الشعاع المنعكس I_r، والآخر يخترق الوسط الثاني، ويسمى الشعاع المنكسر I_t كما في الشكل (1−18).



الشكل (1−18): سقوط شعاع ضوئي على حد فاصل بين وسطين[2].

حيث: θ_i زاوية الورود الكائنة بين الشعاع الوارد والناظم على الحد الفاصل و θ_r زاوية الانعكاس و θ_t زاوية الانكسار. فإذا كانت $n_2 > n_1$ ينكسر الشعاع النافذ مقترباً من الناظم، وإذا كانت $n_1 > n_2$ ينكسر الشعاع النافذ مبتعداً عن الناظم. تمكننا قوانين سنل ديكارت من تعيين منحى الشعاعين المنعكس والمنكسر، وتزودنا بالنتائج الآتية:

1−يقع الشعاعان المنعكس والمنكسر في مستوي الورود.

2−زاوية الانعكاس تساوي زاوية الورود، وتعاكسها بالإشارة.

3−من أجل ضوء وحيد اللون، عندما تجتاز أي قدرة حداً فاصلاً يعطى اتجاه الشعاع النافذ بقانون سنل ديكارت كما يأتي $n_1 \sin\theta_i = n_2 \sin\theta_t$. الذي يكتب بالشكل العام الآتي :

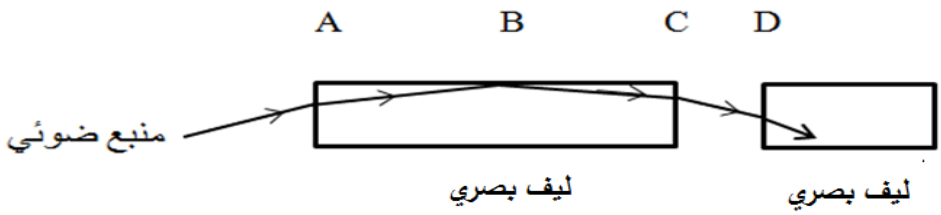
$$\frac{\sin\theta_i}{\sin\theta_t} = \frac{n_2}{n_1} \qquad (30-1)$$

إن المسائل المتعلقة بكمية الضوء المنعكس عند حد فاصل بين عازلين تشكل جزءاً مهماً من دراسة البصريات وتطبيقها؛ وخاصة في مجال تصميم الأنظمة الليفية وتحليلها. نبين في الشكل (1−19) حالات السطوح العاكسة التي يتضمنها الليف البصري والتي هي [2]:

1−الحد الفاصل بين الهواء والزجاج حيث يقرن الضوء من المنبع إلى الليف.

2−السطح البيني لنواة الليف وطبقته المحيطية.

3−حدّا الفصل هواء زجاج حيث يوجد ثغرة هوائية بين الليفين المتصلين.



الشكل(1−19): السطوح العاكسة في نظام ليفي[2].

يتضح للقارئ أنه من المرغوب فيه أن يكون الضوء المنعكس عند المدخل (النقطة A)، وعند ثغرة الموصل (النقطة D) أصغر ما يمكن؛ لأن هذه الانعكاسات تنقص القدرة الموصلة. وعلى العكس من ذلك يجب أن يكون الانعكاس الداخلي على السطح البيني (النقطة B) أكبر ما يمكن من أجل حجز الضوء داخل الليف.

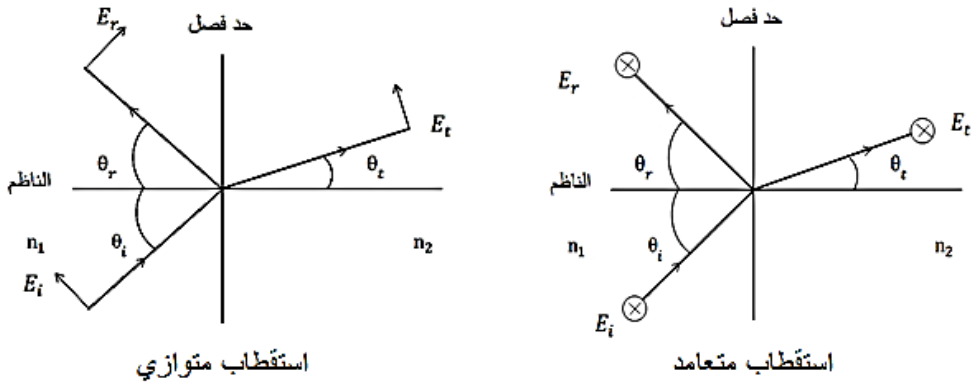
وكما ذكرنا سابقاً أنه في دراستنا لانتشار الأمواج في الأوساط العازلة نعبر عن الموجة الكهرومغناطيسية بمركبة الحقل الكهربائي فقط. لذلك نعرف الانعكاسية على حدّ الفصل بأنها نسبة مركبة الحقل الكهربائي المنعكس إلى الحقل الكهربائي الوارد. فعندما يرد شعاع ضوئي بزاوية ما على حدّ فاصل بين وسطين لهما قرينتا انكسار مختلفتان، نحدد مستوي الورود بالمستوي المعين بالعمود على سطح الفصل، وباتجاه مسير الموجة الواردة. يعتمد الجزء المنعكس من الضوء على زاوية الورود، وعلى استقطاب الحقل الكهربائي بالنسبة لمستوي الورود؛ بينما يعتمد معامل الانعكاس على كون الحقل الكهربائي مستقطباً عمودياً على مستوي الورود أو موازياً له، فندعو الموجة العمودية باستقطاب ρ_p والموجة الموازية باستقطاب ρ_s كما في الشكل (1−20)؛ لذلك نعرف معاملي الانعكاس للحالتين والمعروفين كقانوني فرينل (Fresnel) للانعكاس كما يأتي [2,10,12,18]:

استقطاب متوازٍ:

$$\rho_p = \frac{-n_2^2 \cos\theta_i + n_1\sqrt{(n_2^2 - n_1^2 \sin^2\theta_i)}}{n_2^2 \cos\theta_i + n_1\sqrt{(n_2^2 - n_1^2 \sin^2\theta_i)}} \qquad (31-1)$$

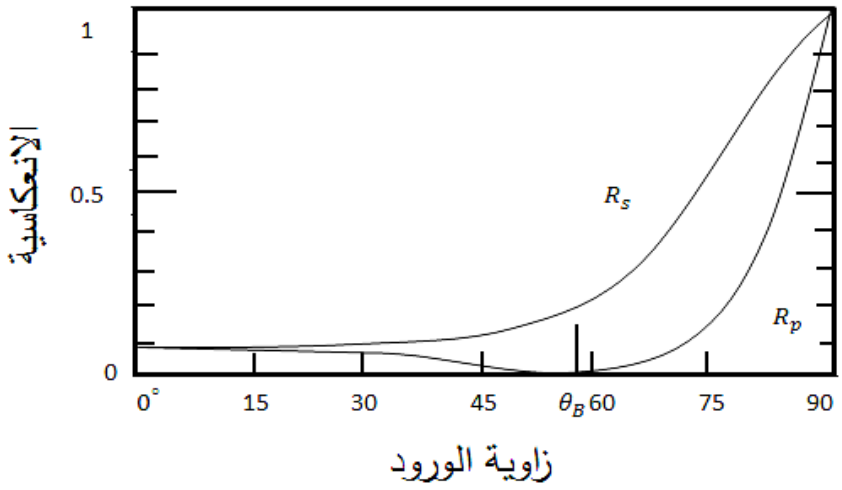
استقطاب متعامد:

$$\rho_s = \frac{n_1 \cos\theta_i - \sqrt{(n_2^2 - n_1^2 \sin^2\theta_i)}}{n_1 \cos\theta_i + \sqrt{(n_2^2 - n_1^2 \sin^2\theta_i)}} \qquad (32-1)$$

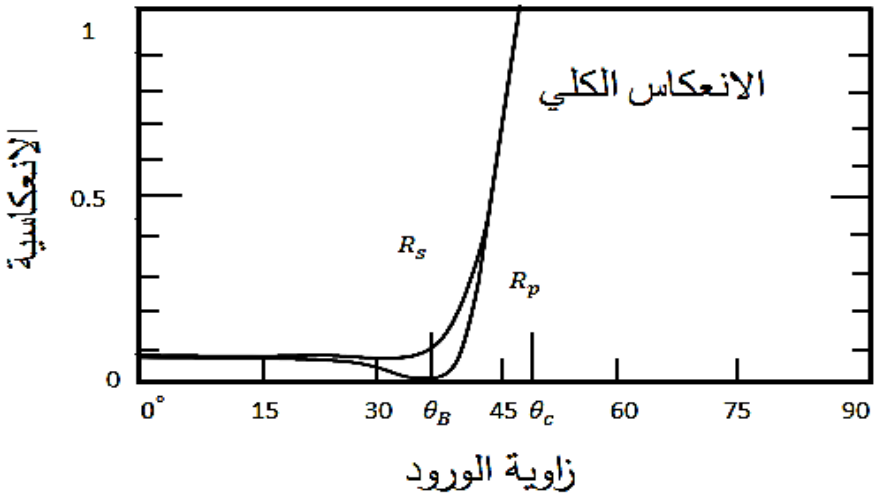


الشكل(1−20): انقسام الانعكاس عند حد الفصل.

فإذا كان $n_2 > n_1$ يصبح معامل الانعكاس سالباً. ويشير هذا إلى فرق طور مقداره π (فرق مسير$\frac{\lambda}{2}$) بين الحقلين الكهربائيين الوارد والمنعكس. تعرف الانعكاسية R بأنها نسبة شدة الحزمة المنعكسة إلى شدة الحزمة الواردة. حيث إن الشدة تتناسب مع مربع الحقل الكهربائي، لذلك فإن الانعكاسية تساوي مربع معامل الانعكاس، أي إن: $R = |\rho|^2$ وتظهر النتائج في الشكل(1−21) من أجل الورود من هواء إلى زجاج، وفي الشكل (1−22) من أجل ورود من زجاج إلى هواء.

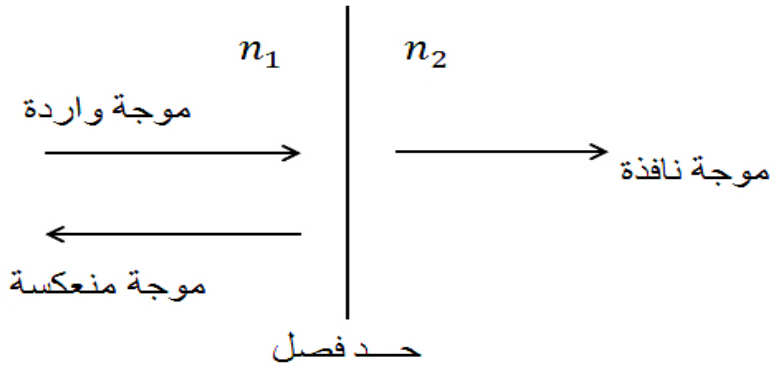


الشكل (1−21): الانعكاسية عند سطح بيني من هواء إلى زجاج[2] .



الشكل (1–22): الانعكاسية عند سطح بيني من زجاج إلى هواء[2].

إن أسهل الحسابات لمعرفة الخسارة الناتجة عن الانعكاس هي تلك التي تنتشر الحزمة من أجلها عمودياً على الحدّ الفاصل كما في الشكل(1–23).



الشكل (1–23): موجة ترد عموديا على حدّ فاصل.

فمن أجل ورود عمودي حيث $(\theta_i = \theta_t = 0)$، ومن المعادلتين(1–31) و(1–32) يكون عامل الانعكاس:

$$\rho = \rho_p = \rho_s = \frac{n_1 - n_2}{n_1 + n_2} \qquad (33-1)$$

فتكون الانعكاسية:

$$R = R_p = R_s = \left(\frac{n_1 - n_2}{n_1 + n_2}\right)^2 \qquad (34-1)$$

بالعودة للشكلين(1–21) و(1–22) نلحظ أنه بزيادة زاوية الورود تتناقص قيمة R_p ؛ بينما تزداد قيمة R_s فتصل الأولى إلى الصفر عند زاوية محددة تسمى زاوية الاستقطاب (زاوية بروستر θ_B). وبعد هذه الزاوية يزداد الاثنان معاً إلى أن يحدث لهما انعكاس كلي.

تبين زاوية بروستر أن الشعاع المنعكس والمستقطب جزئياً يصبح مستقطباً استقطاباً تاماً عند هذه الزاوية، ويتعلق وروده بقرينة الانكسار، وهذا يعني أن لكل مادة شفافة زاوية استقطاب خاصة θ_B تعطى بالعلاقة الآتية:

$$\tan\theta_B = \frac{n_2}{n_1} \qquad (35-1)$$

نلخص النتائج الموضّحة في الشكلين (1−21) و (1−22) بما يأتي:

1−لا تتغير الانعكاسية بمقدار مهم من أجل زوايا ورود قريبة من الصفر.

2−إن مقدار انعكاسية يساوي صفراً يعني نفاذاً كاملاً عند زوايا ورود، وحالات استقطاب محددة.

3−إن مقدار انعكاسية يساوي واحداً يشير إلى انعكاس كامل من أجل مدى ما من الزوايا.

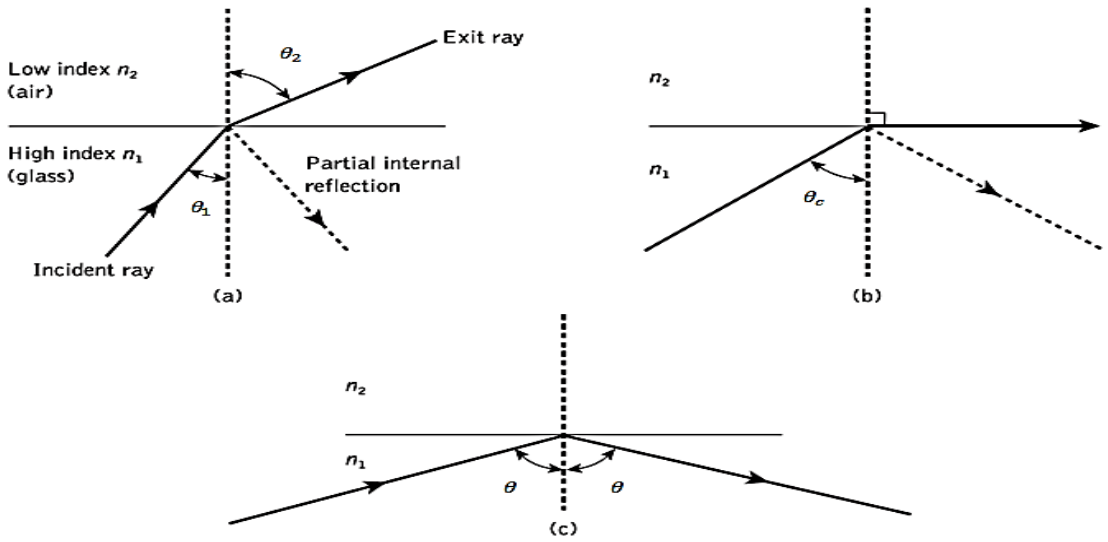
يبين الشكل(1−22) أنه عند الورود من منطقة ذات قرينة انكسار أكبر، فإن الانعكاس الكلي يحدث عند زاوية محددة تسمى الزاوية الحرجة، يرمز لها θ_c.

فمن أجل انعكاسية تساوي صفراً: يبين الشكلان(1−21) و(1−22) أنها تحدث فقط من أجل الاستقطاب الموازي، وهذا يحدث عند زاوية بروستر[2,3,18]. ولا يوجد زاوية تجعل انعكاسية الاستقطاب العمودي صفراً. فتفيدنا زاوية بروستر في إرسال حزمة ضوئية من وسط عازل وإليه من غير خسارات انعكاس.

1−7 الانعكاس الداخلي الكلي .Total Internal Reflection:

بينا في الفقرة السابقة أن ورود الضوء على سطح يفصل بين عازلين مختلفين في قرينتي انكسارهما يؤدي إلى حدوث انعكاس، وانكسار للشعاع الوارد، ويُحدّد مسار الشعاع النافذ؛ وفق قانون سنيل ديكارت. فعندما يرد الضوء من وسط أقل كسراً إلى وسط أشد كسراً، يدعى الانعكاس في هذه الحالة بالانعكاس الخارجي. أما عندما يرد من وسط أشد كسراً إلى وسط أقل كسراً، يقال في هذه الحالة عن الانعكاس بأنه داخلي. حيث إنه لكل مادة زاوية محددة يحدث عندها الانعكاس الداخلي الكلي.

يبين الشكل(1−24) شعاعاً ضوئياً يسقط بزاوية θ_1 على حدّ يفصل بين وسطين عازلين قرينة انكسار الأول n_1 أكبر من قرينة انكسار الثاني n_2 . عندئذ ينكسر الشعاع الوارد في الوسط الثاني؛ مبتعداً عن الناظم بزاوية θ_2 ، فيكون $\theta_2 > \theta_1$. وكما ذكرنا سابقاً أن زاوية الورود ترتبط بزاوية الانكسار؛ وفق قانون سنيل ديكارت المعرّف بالعلاقة (1−30).



الشكل(1−24): ورود شعاع ضوئي من وسط ذي قرينة انكسار أكبر إلى وسط ذي قرينة انكسار أقل.

(a): انعكاس داخلي جزئي. (b): حالة حدية للانعكاس الداخلي $\theta = \theta_c$. (c): انعكاس داخلي كلي $\theta > \theta_c$ [17,13,3].

نلحظ من الشكل(1−24−a) أنه هناك كمية ضئيلة من الضوء المنعكس في الوسط الأول (انعكاس داخلي جزئي)، فبزيادة زاوية الورود تزداد زاوية الانكسار، فعندما تصبح زاويةُ الانكسار 90 والشعاع المنكسر موازياً للسطح الفاصل بين الوسطين نحصل على الحالة الحدية للانكسار كما في الشكل (1−24−b). تدعى زاوية الورود في هذه الحالة بالزاوية الحرجة θ_c. فنحصل من قانون سنيل على العلاقة التي تعطينا الزاوية الحرجة كما يأتي:

$$\sin\theta_c = \frac{n_2}{n_1} \qquad (36-1)$$

فعندما تحقق زاوية الورود θ الشرط $\theta_c \leq \theta \leq 90$ سيحدث انعكاس داخلي كلي بكفاية 99.9% كما في الشكل(1−24−c).

نعبر رياضياً عما سبق كمايأتي: من المعادلتين(1−31) و(1−32) يكون $\rho_p = 1$ و$\rho_s = 1$، وهذا يوافق انعكاساً كلياً لمركبتي الحقل. يحدث ذلك فقط عندما يكون : $n_2^2 - n_1^2 \sin\theta_i = 0$. والزاوية التي تحقق هذه المعادلة هي الزاوية الحرجة θ_c. المعطاة بالعلاقة (1−36).

وبما أن جيب الزاوية لا يبلغ أبداً قيمة أكبر من واحد، فإنه يبدو واضحاً من هذه النتيجة أن انعكاسات الزاوية الحرجة تحدث فقط عندما تمرُّ الموجة من منطقة ذات قرينة انكسار أعلى إلى منطقة ذات قرينة انكسار أدنى [17,13,3]. أي يحدث انعكاس داخلي كلي من أجل زوايا ورود أكبر من الزاوية الحرجة θ_c كما أوضحناها في الشكل (1−24−b).

1-8 الاستقطاب .Polarization:

أول تجربة للاستقطاب كانت في عام 1670 عندما راقب بارثيونيوس سقوط الشعاع على بلورتين من الكالسيت بأنصاف أقطار مختلفة، وتوصل إلى نتيجة أن بلورة الكالسيت مادة ذات انكسار مضاعف. وفي وقت لاحق بيّن هويغنز أنه بتدوير بلورة الكريستال الثانية؛ إذ شدة الشعاع كانت عظمى عندما انعدمت في البلورة الأولى. وبعد دوران 90 انعكست الشدات، وانقلبت الآلية.

بداية استعمل هويغنز مصطلح الضوء المستقطب؛ ليشرح التجربة: فالضوء الطبيعي يتكون من حزمتي أشعة مستقلتين وباستقطابين متعاكسين. وفي وقت لاحق، وضِعَ عددٌ من القوانين (زاوية بروستر، قانون مالوس..) ذلك حتى عام 1852 وضع ستوكس المعلمات الفعلية التي تصف الاستقطاب. وفي عام 1892 قدم بوانكاريه تمثيلاً هندسياً للاستقطاب في نقطة من الفراغ. وفي الآونة الأخيرة عام 1940 أُدخِلت طريقتا الجبر والمصفوفات: مصفوفات مولر و مصفوفات جونز الحسابية. تعطي هذه الأدوات الرياضية فكرة مثالية لتحديد حالة استقطاب الضوء المار عبر النظام البصري، وحساب شدة الضوء الذي يُرسَل.

تنبعث الموجات الضوئية من معظم المصادر الضوئية بشكل عشوائي حيث يكون فيها متجهة الحقل الكهربائي عشوائية، وتتغير بسرعة حول محور الانتشار. فالضوء في هذه الحالة متناظر؛ وفق محور الانتشار وهذا يسمى بالضوء الطبيعي. وهناك مصادر أخرى تبعث ضوءاً غير متناظر؛ مثل الليزر، يقال في هذه الحالة إن هذه المصادر مستقطَبة ؛ فضلاً عن ذلك هناك ما يسمى بالضوء المستقطب جزئياً. حيث حُصِل على هذا النوع من الضوء من خلال الممارسة العملية في مجالات مختلفة:

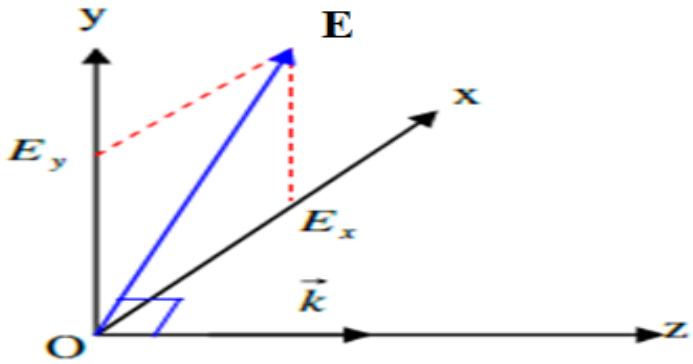
- فعندما يمرُّ شعاع الضوء المستقطَب ضمن مادة غير مستقطبِة؛ فإنه يخضع لإزاحات طورية عشوائية بين المركبتين الأساسيتين المتعامدتين.
- أو عن طريق الانعكاسات على الزجاج في حالة الورود المائل للضوء غير المستقطب الذي يزيد من استقطاب المركبة TE بالنسبة للمركبة TM .

هنا تأتي الحاجة لإدخال معلمات أخرى: درجة الاستقطاب DOP؛ الأمر الذي يوضح كثافة الضوء الواردة المحمولة على مركبة الاستقطاب بالنسبة للكثافة الكلية. في حال وجود ضوء مستقطب خطياً على نحوٍ جزئي (يمر عبر المستقطب .) فإنه من المفيد استعمال الصيغة الآتية :

$$DOP = \frac{P_{Max} - P_{Min}}{P_{Max} + P_{Min}} \qquad (37-1)$$

حيث: P_{Max}, P_{Min} الشدات المنقولة الصغرى والعظمى على الترتيب. فعندما يكون $DOP = 0$ نقول عن الضوء بأنه غير مستقطب، وعندما يكون $DOP = 1$ فالضوء مستقطب كلياً، وعندما يأخذ DOP قيمة بين هاتين القيمتين يكون الضوء مستقطب جزئياً.

لوصف مختلف مركبات الاستقطاب نأخذ نموذجاً ضوئياً: ليكن لدينا موجة كهرطيسية مستوية تنتشر في الفراغ ثلاثي الأبعاد oxyz حيث oz موازٍ لجهة الانتشار كما في الشكل(1−25). نأخذ بالحسبان فقط مركبة الحقل الكهربائي للموجة الضوئية؛ لكون الحقل الكهربائي له تأثير أكبر من ذلك الناتج عن الحقل المغناطيسي.



الشكل(1−25): تمثيل الحقل E في الفراغ oxyz.

حيث : E_x و E_y مركبات الحقل الكهربائي، $\vec{k}$ متجه الموجة.

النقطة المهمة بالنسبة لنا هي التوجه المكاني للحقل الكهربائي وتغيره مع الزمن. يمكننا أن نمثل الحقل في وقت معين أو أن نسعى لمعرفة التغير النهائي للحقل بمرور الزمن عند نقطة ما. إنه لمن المفيد أن نميز ثلاث حالات خاصة ومهمة لاستقطاب الضوء والتي هي: الخطي والدائري والإهليليجي.

لتمثيل مركبة الاستقطاب للموجة المستقطبة، يجب علينا استعمال مفهوم رياضي مناسب للمسألة لمعالجتها؛ لأن المسار النهائي للحقل يصف طبيعة المنحني، ويؤدي ذلك مباشرة إلى تمثيلها كتابع للزمن. نلاحظ أن الحركة النهائية لـ $\vec{E}$ دورية، ففي هذه الحالة تمثيل مركبة الاستقطاب بصورة مستقلة عن الزمن، فعلياً يعد تمثيلاً خاصّاً كتابع للزمن. فيما سبق وصفنا تمثيلات مختلفة لحالات الاستقطاب والتي نسميها التمثيل الزمني.

التمثيل الزمني للاستقطاب:

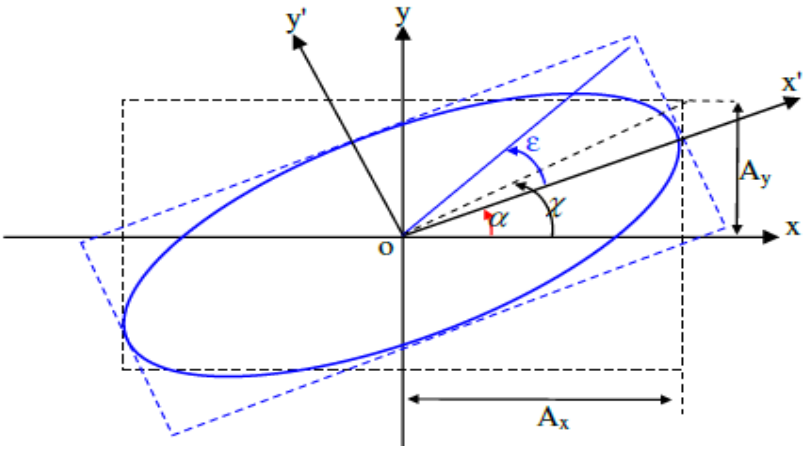
هو التمثيل الأكثر سهولة لحالات الاستقطاب الممكنة، وفي الواقع هذا النوع من التمثيل يستعمل التمثيل الزمني لمركبات استقطاب الموجة المستوية.

أولاً- الاستقطاب الإهليليجي:

هو الحالة الأكثر شيوعاً للموجة المستوية أحادية اللون في وسط متجانس. ففي لحظة ما، مختلف متجهات موجة الحقل الكهربائي موجهة بحيث تنتشر حلزونياً ويكون لمسقطها في نهاية المسار شكل القطع الناقص كما في الشكل(1-26). تكون مركبات الحقل الكهربائي عرضية، وتكتب وفق مايأتي:

$$\begin{cases} E_x(z,t) = A_x.\cos(\omega t - kz) \\ E_y(z,t) = A_y.\cos(\omega t - kz - \varphi) \end{cases} \qquad (38-1)$$

حيث : φ_x و φ_y قيمتا الطور الثابتتان من أجل الطول الموجي المعطى والتي تميز حالة الاستقطاب. و $\varphi = \varphi_y - \varphi_x$ يمثل الإزاحة الطورية بين اهتزازتي الحقل المتعامدتين (فرق الطور بين مركبتي الحقل).



الشكل (1-26): معاملات حالة الاستقطاب الإهليليجي.

نحلّل خصائص مركبة الاستقطاب في المستوي z=0 وذلك بحذف الزمن من المعادلتين (38-1) السابقتين، فنحصل على:

$$\frac{E_x^2}{A_x^2} + \frac{E_y^2}{A_y^2} - \frac{2E_xE_y\cos\varphi}{A_xA_y} = \sin^2\varphi \qquad (39-1)$$

فنحصل على معادلة قطع ناقص. ولابد أن نحدد المحاور الرئيسة للقطع الناقص عن طريق إجراء عملية دوران ما بالنسبة لزاوية مرجعية α. تصبح المعادلة كما يأتي:

$$\frac{E_x^2}{a^2} + \frac{E_y^2}{b^2} = 1 \qquad (40-1)$$

a و b أطوال أنصاف أقطار القطع الناقص. نلاحظ أن مسقط E على مستوٍ معامد لاتجاه الانتشار هو قطع ناقص ؛ فضلاً عن ذلك تمييز هذا النوع من الاستقطاب يعتمد على اتجاه دوران E يساري ويميني. التعبير المعتاد استعماله للمراقبة هو: وفقاً للمحور $(-\overrightarrow{oz})$.

ثانياً: الاستقطاب الدائري:

هو الحالة الخاصة الأولى من الاستقطاب الإهليلجي التي تحدث عندما يكون فرق الطور بين المركبتين المتعامدتين والمعامدتين لمنحى الانتشار مساوياً لـ $\pm\frac{\pi}{2}$ ،وعندما تكون السعات A_y وA_x متساوية أيضاً. وبدوره تبّسط المعادلة (1−39)، فتصبح:

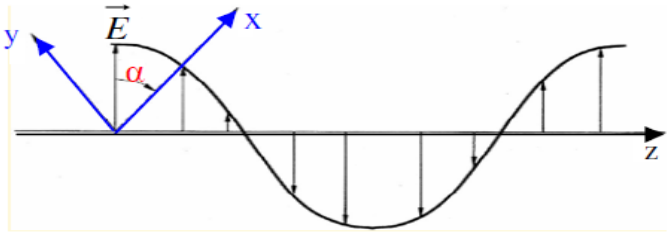
$$\frac{E_x^2}{A_x^2}+\frac{E_y^2}{A_x^2}=1 \qquad (41-1)$$

وهي معادلة دائرة نصف قطرها A_x. وكما هو في الاستقطاب الإهليليجي، فإشارة φ تحدد جهة دوران الحقل $\vec{E}$: (+) للاستقطاب اليساري و(−) للاستقطاب اليميني.

ثالثاً− الاستقطاب الخطي:

هو الحالة الخاصة الثانية من الاستقطاب الإهليليجي التي تحدث عندما يكون $\varphi = 0$ أو $\varphi = \pi$. تحافظ فيها متجهات الموجة على اتجاه ثابت بمرور الزمن. ونهاية مسارها يكون مستقيماً كما هو واضح في الشكل(1−27). يسمى هذا الاتجاه باتجاه الاهتزاز. فمن وجهة نظر رياضية تصبح المعادلة(1−38) كما يأتي:

$$E_y=\pm\frac{A_y}{A_x}E_x \qquad (42-1)$$



الشكل(1−27): تمثيل لحظي لموجة مستقطبة خطياً.

وهذا واضح أنه في هذه الحالة اختُصِرت القطع الناقص إلى قطعة مستقيمة (خط مستقيم).

الفصل الثاني

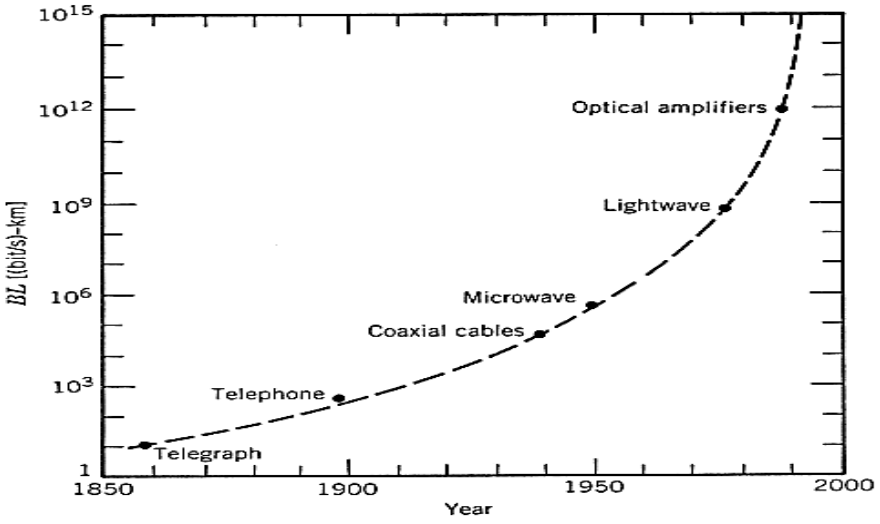
الألياف البصرية

(Optical Fibers)

الفصل الثاني- الألياف البصرية
Optical Fibers

2-1 مقدمة .Introduction:

تعد خطوط النقل عناصرَ أساسيةً في نظم الاتصالات السلكية، فهي الجزء الأعلى كلفة، ولا سيما في الأنظمة بعيدة المدى. لذلك كان التركيز منذ البداية على تصميم خطوط اتصال جديدة وتصنيعها بكفاية عالية، وبكلفة منخفضة. وفي الحديث عن كفاية خطوط النقل وجب التركيز على أمرين اثنين. الأول- عرض النطاق الترددي للخط الذي يحدد سَعَةَ الإرسال، والثاني: مقدار الفقد للخط الذي يحّدد المسافة بين مكررات الإرسال [20-19]. وقد ظهرت أشكال جديدة لأنظمة الاتصالات عبر السنوات الماضية. ويبين الشكل(2-1) تطور هذه الأنظمة [21]؛إذ يمثل المحور الشاقولي (bit rate-distance product-BL) جداء معدل البت B بالمسافة L ؛ بينما يمثل المحور الأفقي العام الميلادي .



الشكل (2-1): ارتفاع معدل البت بالمسافة في الفترة الزمنية(2000-1850) وتطور أنظمة الاتصالات خلالها[21].

وقد لُحظ في النصف الثاني من القرن العشرين أنه يمكن زيادة جداء معدلات البت بالمسافة؛ باستعمال الأمواج الضوئية كحامل للمعلومات؛ إذ إن تردد هذه الأمواج المستعملة 200THz تقريباً، زادَ كمية المعلومات المرسلة بصورة جيدة. وقد سهّل اختراع الليزر عام 1960 عملية إنشاء نظام جديد للاتصالات عبر الألياف البصرية، كان أول نظام اتصالات بالألياف البصرية في البدايات يعاني من التخامد العالي جداً، حوالي 1000 dB /km، ثم تطورت هذه الأنظمة، وانخفض فيها التوهين في العام 1970 إلى 20 dB /km بالقرب من الطول الموجي 1μm ، ثم بدأ العمل بنظام الاتصالات بالألياف البصرية عند النافذة الأولى 0.8μm في العام 1980 وكان معدل البت 45Mb/s والمسافة بين المكررات 10 km . ثم في النافذة الثانية عند الطول الموجي 1.3μm،

حيث وصل التخامد فيها إلى أقل من 1 dB /km وكان معدل البت محدداً بالقيمة 100 Mb/s بسبب التشتت متعدد النمط الذي أستبعد باستعمال الألياف وحيدة النمط، فوصل معدل البت فيها إلى 2 Gb/s ، ولمسافة تصل إلى 44 km . وعند الانتقال للعمل في النافذة الثالثة ذات الطول الموجي 1.55 μm وصل التخامد فيها إلى 2 dB /km ، لكنها بالمقابل كانت تعاني من التشتت الكبير، وحُلّت هذه المشكلة باستعمال الألياف ذات التشتت المزاح؛ وبهذا وصل معدل البت إلى4 Gb/s لمسافة تتجاوز 100 km، وفي بدايات القرن الحادي والعشرين استعمل التجميع بتقسيم طول الموجة لزيادة معدلات البت، فوصلت عام 2001 إلى 10 Tb/s

[17–21–22]، ويبين الجدول(2–1) أجيال الألياف البصرية.

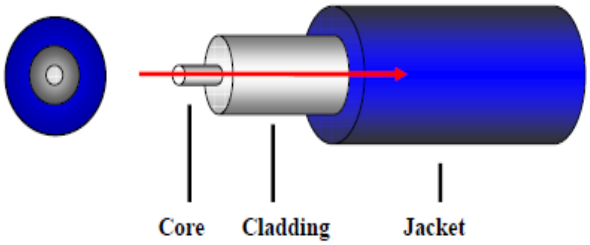
الجدول(2–1): أجيال الألياف البصرية .

(1980) 0.8–μm systems	ألياف متدرجة القرنية (Graded Index)
(1985) 1.3–μm systems	ألياف وحيدة النمط (Single Mode) Fibers)
(1990) 1.55–μm systems	ليزرات وحيدة النمط (Single Mode) Lasers)
(1996) WDM systems	المضخمات الضوئية (Optical Amplifiers)
(2002) L and S bands	تضخيم رامان (Raman) Amplification)

2–2 البنية العامة لليف، وآلية توجيه الضوء General Structure of the Fiber and Guidance of Light:

2–2–1 البنية العامة لليف:

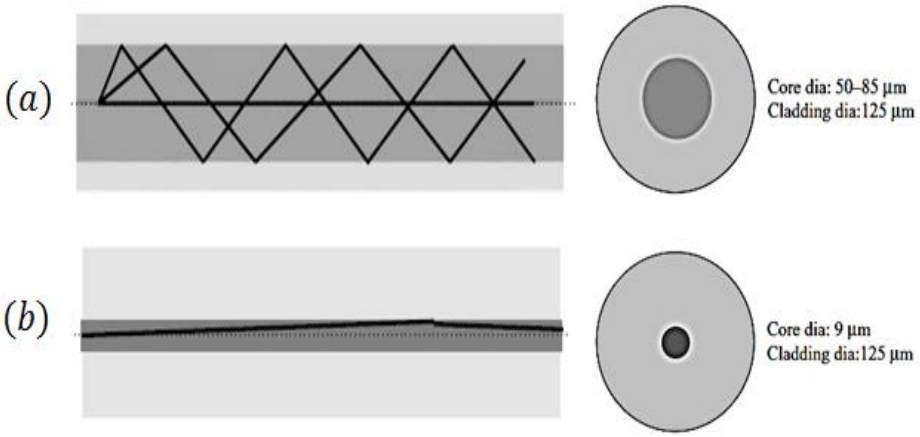
الليف البصري: عبارة عن دليل موجي عازل له شكل أسطواني يعمل عند الترددات الضوئية. دليل الموجة هذا، يحجز الضوء ضمنه، ويقوده وفق محوره إلى نهايته. يبين الشكل(2–2) البنية العامة لليف البصري، حيث يتكون من منطقة داخلية تدعى النواة (Core) بقرينة انكسار n_1 تحيط بها منطقة أخرى بقرينة انكسار n_2 تدعى الغلاف(Cladding) بحيث يكون $n_1 > n_2$، وتشكل هاتان الطبقتان دليل الموجة الذي يوجه الضوء وفق محوره بالانعكاس الداخلي الكلي. تغطى هذه المنطقة التي تؤدي دوراً أساسياً في توجيه الضوء بطبقة واقية للحماية.



الشكل (2–2): يبين البنية العامة لليف البصري[23,22].

يمكن أن نصف انتشار الضوء على طول الليف بمصطلح يطلق على الأمواج الكهرطيسية الموجّهة يدعى بالأنماط. فإذا كان قطر النواة كبيراً نسبياً (50 – 85 µm) يمكن أن ينتشر ضمن الليف أكثر من نمط، فنحصل على ليف متعدد الأنماط (Multimode Fiber–MMF) كما يبينه الشكل(2–3–a). وعلى العكس من ذلك كما يبين الشكل(2–3–b) إذا كان قطر النواة صغيراً؛ مقارنة بالطول الموجي، فإنه يسمح بانتشار نمط وحيد، ويكون لدينا في هذه الحالة ليف بصري أحادي النمط.

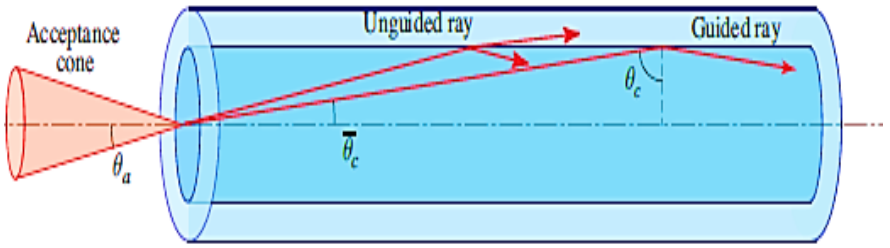
(Single mode Fiber–SMF) ذو قطر نواة صغير بحدود (9µm). تحاط النواة بغلاف بقطر(125µm) .[23,22]



الشكل(2–3): a) ليف بصري متعدد الأنماط. b) ليف بصري أحادي النمط[23,22].

2–2–2 آلية توجيه الضوء ضمن الليف:

تسمح بنيةُ الليفِ ذو نواة قرينة انكسارها أقل من قرينة انكسار الغلاف بتوجيه الضوء ضمنه؛ وفق آلية الانعكاس الداخلي الكلي الموضحة في الفصل الأول. حيث نعرف الزاوية الحرجة بالعلاقة(1–63) لذلك تنتشر في الليف فقط الأشعة التي تحقق الشرط $\theta_c \leq \theta \leq 90$. حيث θ زاوية ورود الشعاع على السطح البيني نواة–غلاف. يبين الشكل(2–4) الزاوية الحرجة، وزوايا ورود الشعاع، وفتحة النفوذ العددية، وزاوية القبول لليف؛ لكونه مستقبلاً بصرياً :



الشكل (2−4): معاملات توجيه الضوء**[23,22,17].**

وعليه نعرف معاملات توجيه الضوء كما يأتي [23,22,17]:

- **قرينة الانكسار الجزئية:**

$$\Delta = \frac{n_1 - n_2}{n_1} \quad ; \Delta \ll 1\% \qquad (1-2)$$

- **زاوية القبول:**

ليس كل الأشعة التي تدخل إلى الليف ستنتشر عبره، ذلك يقودنا إلى تعريف مخروط القبول بأنه زاوية دخول الشعاع θ_a التي يتحقق عندها شرط الانعكاس الداخلي الكلي. نعرف من الشكل(2−4) مخروط القبول بـ $2\theta_a$

- **فتحة النفوذ العددية:**

تمكننا نظرية الشعاع الحصول على علاقة تربط زاوية القبول بقرائن انكسار الهواء والنواة والغلاف. يقودنا ذلك إلى إيجاد علاقة فتحة النفوذ العددية بدلالة معاملات الليف؛ بتطبيق قانون سنيل ديكارت على الشعاع الوارد من الهواء إلى نواة الليف:

$$n_0 \sin\theta_a = n_1 \sin\bar{\theta}_c \qquad (2-2)$$

$$n_0 \sin\theta_a = n_1 \cos\theta_c \quad ; \quad \theta_c + \bar{\theta}_c = \frac{\pi}{2}$$

تصبح عبارة فتحة النفوذ العددية؛ بدلالة الزاوية الحرجة كما يأتي:

$$N_A = n_0 \sin\theta_a = n_1\sqrt{(1-\sin^2\theta_c)} = \sqrt{n_1^2 - n_2^2}$$

$$N_A = \sin\theta_a = \sqrt{n_1^2 - n_2^2} = n_1\sqrt{2\Delta} \qquad (3-2)$$

تبرز أهمية هذه العلاقة في قياس قدرة الربط مع الألياف البصرية.

2-3 مواد تصنيع الألياف البصرية Fiber Optic Manufacturing Materials:

يتطلب الإرسال الفاعل ضمن الليف أن يكون كلٌ من النواة والغلاف صغيري الخسارة قدر الإمكان، يبين الجدول(2-2) أنواع الألياف؛ بحسب المواد التي تصنع منها.

الجدول(2-2): أنواع الألياف بحسب مواد التصنيع:

الغلاف	النواة	
زجاج	زجاج	المادة
بلاستيك	زجاج	
بلاستيك	بلاستيك	

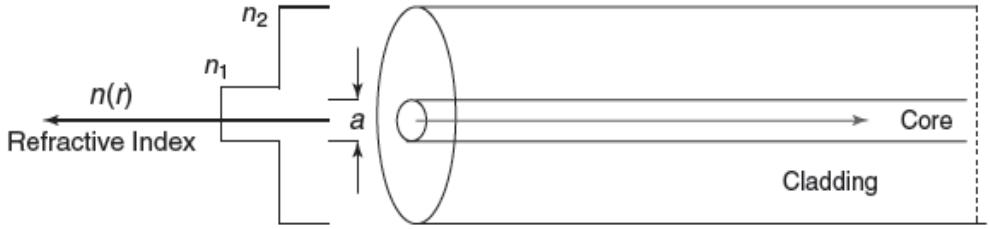
تكون قرينة الإنكسار أصغر للألياف المصنوعة كلياً من الزجاج، وأكبر بقليل للألياف المصنوعة من السيليكا والمغلفة بالبلاستيك(Plastic Coated Silica-PCS)، وتكون الأكبر من أجل الألياف المكونة كلياً من البلاستيك. لذلك يكون اتساع النبضة، وفتحة النفوذ العددية صغيرين في الألياف المكونة كلياً من الزجاج وأكبر منهما في ألياف PCS وأكبر في الألياف المكونة كلياً من البلاستيك. تصنف السيليكا النقية بأنها ذات خسارة منخفضة، حاليّاً معظم الألياف المصنوعة من السيليكا تنقل 96% من الطاقة لمسافة 1km عبر الليف [2,13,24,25]؛ مما سبق نكون الاستنتاجات الآتية :

- إن الألياف المصنوعة كلياً من الزجاج أقل خسارة وأقل اتساع نبضة؛ لذلك تصلح للاستعمال لمسافات طويلة، وبمعدلات إرسال عالية نوعاً ما.
- إن ألياف PCS ذات خسارة، واتساع نبضة أكبر من الألياف المكونة كلياً من الزجاج؛ لذلك تُستعمَل للإرسال للمسافات القصيرة (100m).
- إن الألياف المصنوعة كلياً من البلاستيك ذات خسارة واتساع نبضة كبير جداُ؛ لذلك تُستعمَل للمسافات القصيرة جداً (أمتار عدة).

2-4 الألياف البصرية أحادية النمط درجية قرينة الانكسار Step Index Single mode Optical fiber(SI/SMF):

تتمتع الألياف البصرية أحادية النمط بقطر نواة صغير؛ مقارنة بالألياف متعددة الأنماط. يبين الشكل (2-5) ليف بصري أحادي النمط درجي قرينة الانكسار. تتغير قرينة الانكسار في هذا النوع من الألياف كما هو في ليف SI/MMF (2-4):

$$n(r) = \begin{cases} n_1 & ; \ r < a \\ n_2 & ; \ r \geq a \end{cases}$$



الشكل (2-5): شكل قرينة الانكسار والأشعة المرسلة عبر SI/SMF[17-26].

تصمم الألياف البصرية أحادية النمط؛ وفق معلمات محددة تسمح بانتشار نمط وحيد يدعى بالنمط الأساسي HE_{11}. ذلك يعني انقطاعاً للأنماط ذات المراتب الأعلى الموافقة للطول الموجي المستعمل. يبين الشكل(2-7) أنه لكل قيمة محددة لـ V هناك مجموعة من الأنماط المنتشرة في الليف، ذلك يمكننا من تحديد شرط انقطاع النمط لليف SMF. نلاحظ أيضاً من الشكل(2-5) انقطاعاً للأنماط HE_{21} وTM_{01} وTE_{01} عند القيمة 2.405 وهي القيمة التي يعمل عندها الليف بنمط وحيد (HE_{11}) يدعى بالنمط الأساسي (Fundamental Mode). فنعبر عن شرط الحصول على ليف بصري أحادي النمط بالعلاقة:

$$V_c \leq 2.405 \qquad (5-2)$$

يقودنا ذلك مباشرة لتعريف طول موجة القطع λ_c التي تحقق الشرط السابق بالعلاقة:

$$\lambda_c \geq \frac{2\pi a\sqrt{n_1^2 - n_2^2}}{2.405} = \frac{2\pi a N_A}{2.405} \qquad (6-2)$$

بدءاً من هذا الطول، ووفق معلمات محددة يكون الليف أحادي النمط؛ أي ينتشر في الليف فقط الأطوال الموجية التي تحقق العلاقة $\lambda_c \leq \lambda$. تتضمن دراستنا للألياف البصرية أحادية النمط توصيف النمط HE_{11} كتحديد حجم البقعة النمطية، وأيضاً معرفة القيود التي يفرضها هيكل الليف بأبعاده الصغيرة على جودة نقل الاشارة عبر هذا النمط كتشتت الدليل الموجي، وتشتت أنماط الاستقطاب [17-26].

2-4-1 حجم البقعة النمطية:

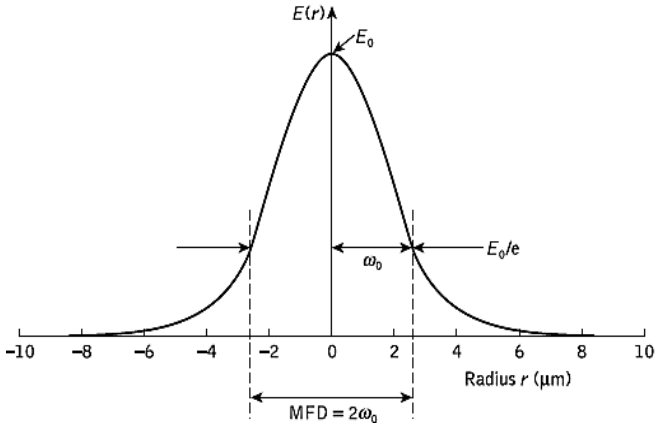
يرتبط توزع الحقل في المستوي العرضي بالنمط الأساسي، والذي يُعدُّ معلمة مهمة؛ لكونها تحدد خسارة الاقتران والانحناء، وتغلغل الطاقة في الغلاف. نعبر من أجل ليف SMF عن توزع شدة الحقل للنمط الأساسي الذي له الشكل الغوصي بالعلاقة:

$$E(r) = E_0 e^{-r^2/w_0^2} \qquad (7-2)$$

حيث w_0 حجم البقعة النمطية. يبين الشكل(2-13) أنه عندما $r = w_0$ تأخذ $E(r)$ قيمة مساوية لـ $1/e$ من قيمة E_0. فمن أجل ليف SMF حيث $0 < V \leq 2.405$ نكتب عبارة حجم البقعة النمطية كما يأتي :

$$\frac{w_0}{a} \approx \left(0.65 + \frac{1.619}{V^{3/2}} + \frac{2.879}{V^6}\right) \qquad (8-2)$$

إن الضوء الصادر عن ليزر He-Ne له توزع كثافة في المستوي العرضي مشابه تماماً لتوزع الضوء الخارج من ليف SMF لكن بفارق وحيد هو أن حجم البقعة لليزر He-Ne أكبر منها للضوء الخارج من الليف. نعرف من الشكل(2-6) الكمية $2w_0$ بقطر النمط للحقل (Mode Field Diameter-MFD) ونعبر عنه بالعلاقة: $MFD = 2w_0$ [26,17].



الشكل (2-6): توزع الحقل للنمط الأساسي في ليف SMF. يبين(MFD) وحجم البقعة النمطية(w_0) [26-17].

2-5 التشتت في الألياف البصرية وحيدة النمط درجية قرينة الانكسار:

إن أهم ما يميز ليف SMF هو سماحه لانتشار نمط وحيد فقط؛ أي تُنقَل طاقة النبضةُ عبر الليف بنمط وحيد، يوافق ذلك ليف ذو تشتت تعدد أنماط معدوم. لكن اتّساع النبضة لا يختفي؛ بسبب اعتماد سرعة المجموعة للنمط الأساسي على الطول الموجي. دراستنا للتشتت في ليف بصري أحادي النمط يعني دراسة آليات التشتت للنمط الأساسي التي تقسم إلى:

- التشتت المادي. حيث يعطى معامل التشتت المادي بالعلاقة:

$$\Delta\tau_W = L.D_W.\Delta\lambda \qquad (9-2)$$

- تشتت الدليل الموجي. حيث يعطى معامل تشتت الدليل الموجي بالعلاقة:

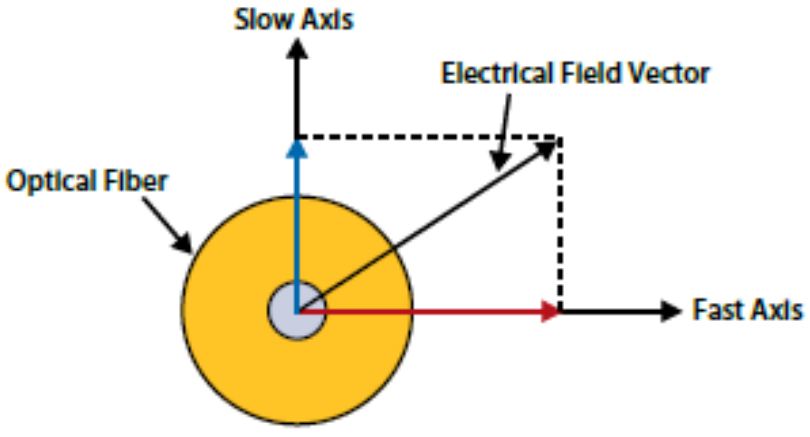
$$D_W = \frac{-n_2\Delta}{3\lambda} \times 10^7[0.080 + 0.549(2.834 - V)^2] \qquad (10-2)$$

- فضلاً عما سبق: تستعمل ألياف SMF للإرسال لمسافات كبيرة، وبمعدل معلومات عالٍ؛ لذلك يجب أن نأخذ بالحسبان تشتت أنماط الاستقطاب (Polarization Mode Dispersion–PMD).

*** تشتت أنماط الاستقطاب(PMD):**

هناك مصدر آخر محتمل اتّساع النبضة في ألياف SMF وهو تغير قرينة الانكسار في المستوي العرضي لليف؛ أي نشوء ظاهرة الانكسار المضاعف. فإن الإشارة المنقولة عبره تعتمد على حالة الاستقطاب؛لأن تغير قرائن الانكسار يعني تغير سرع المجموعة. تحدث ظاهرة الانكسار المضاعف في الليف لسببين، الأول: ناتج عن مادة الليف بسبب آليات الإجهاد والضغط عند تصنيع الليف والانحناء والالتواء على طول الناقل الليفي. السبب الثاني مرتبط بهندسية الليف وانحرافه عن الشكل الدائري. فإذا كان للنبضة المدخلة إلى الليف مركبتا استقطاب ستتوسع بسبب تشتتهماعند انتشارهما عبر الليف، تعرف هذه الآلية بتشتت أنماط الاستقطاب (PMD).

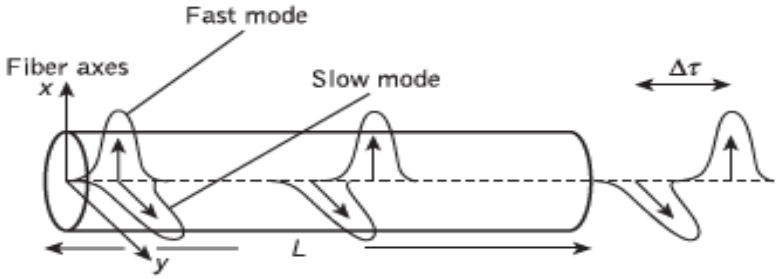
تنتشر الحقول الكهرطيسية في تقريب التوجيه الضعيف وفق z، لذلك تكون الحقول الكهربائية والمغناطيسية تقريبا عرضية. تدعم ألياف SMF وجود نمطين ينتشران بصورة مستقلة عن الآخر. نعبر في هذه الحالة عن الحقول الكهربائية بـ E_x أو E_y كما في الشكل(2–7).



الشكل (2–7): مركبتي الحقل للإشارة المنقولة عبر ليف ذي قرينة انكسار مضاعفة.

إنّ مركبة الحقل الكهربائي لأحد الأنماط تكون وفق x بثابت انتشار β_x، والمغناطيسي وفق y. وتكون من أجل النمط الآخر مركبة الحقل الكهربائي وفق y بثابت انتشار β_y، والمغناطيسي وفق x. فإذا كان مقطع الليف

دائرياً تماماً يكون هذان النمطان متوالدين $\beta_x = \beta_y$. لكن من الصعب تصنيع ألياف بمقطع دائري مثالي؛ وهذا يسبب تغيراً في ثوابت الانتشار β_y وβ_x ؛ ومن ثم وبالتالي مقلوب سرع المجموعة β_{1y} وβ_{1x} لمكونات الاستقطاب وفق x وy مختلفة.



الشكل(2−8): تغير زمن وصول مركبتي النبضة المدخلة إلى الليف نتيجة لتشتت أنماط الاستقطاب.

عموماً، ومن الشكل(2−8) تصل هاتان المركبتان إلى نهاية الليف بزمنين مختلفين. نعبر عن زمن التأخير بين هاتين المركبتين لليف طوله L بالعلاقة:

$$\Delta\tau_P = \left|\frac{L}{\vartheta_{gx}} - \frac{L}{\vartheta_{gy}}\right| = L\left|\beta_{1x} - \beta_{1y}\right| = L\Delta\beta_1 \qquad (11-2)$$

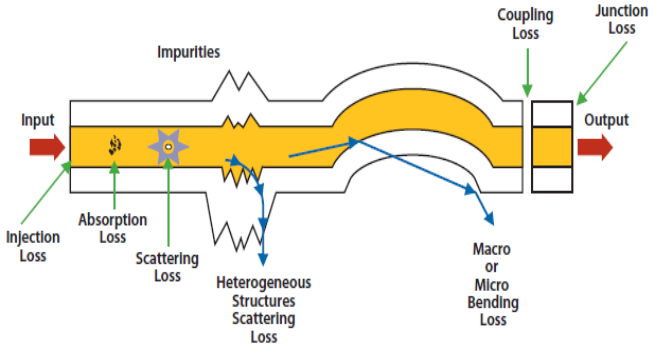
يمكن تخفيض تشتت أنماط الاستقطاب بإرسال الضوء بحيث يكون مستقطباً وفق إحدى المركبتين. على أية حال لا تعدُّ حالة الاستقطاب النهائية مصدر قلق بالنسبة لمعظم الأنظمة التي تستعمل الموجات الضوئية حيث إن أجهزة الكشف الضوئي غير حساسة لحالة الاستقطاب. والذي يؤثر في هذه الأنظمة ليست حالة الاستقطاب العشوائي؛ إنما اتّساع النبضة الناتج عن التغيرات في قرائن الانكسار[17,21,29].

2−6التخامد في الألياف البصرية Attenuation in Optical Fibers:

فضلاً عن آلية التشتت التي يحدّ من سعة الارسال في أنظمة الاتصال بالألياف البصرية؛ نتيجة اتّساع النبضة الضوئية عند انتشارها عبر الليف، هناك آلية أخرى تحد من سَعَةِ الإرسال، وهي الفقد في طاقة الإشارة التي تصل إلى المستقبلات. تتطلب جميع المستقبلات في أي نظام اتصالات أن تكون طاقة الدخل فيها فوق سوية دنيا، وهكذا تؤدي خسارات الإرسال إلى الحدّ من مسافة الإرسال. نعرف تلك الخسارة بمفهوم التخامد، ونعبر عنه بالديسبل (dB) الذي يستعمل لمقارنة مستويين من الطاقة [24]. فإذا كانت L مسافة الإرسال و P_{in} وP_{out} الطاقة عند مدخل الليف ومخرجه على الترتيب، نعرف معامل التخامد بـ (dB/km) بالعلاقة:

$$\alpha_A = -\frac{10}{L}\log_{10}\left(\frac{P_{out}}{P_{in}}\right) \qquad (12-2)$$

كما ذكرنا سابقاً تصنع الألياف من المواد البلاستيكية والزجاجية، حيث تتضمن متطلبات المادة التخامد الضعيف، وإمكانية تشكيلها ألياف شعرية طويلة. للألياف الزجاجية امتصاصّ أقل من الألياف البلاستيكية؛ لذلك تفضل من أجل الإرسال للمسافات الطويلة. يبين الشكل(2−9) مختلف آليات التخامد في الألياف البصرية التي تتمثل في التركيب المادي؛ كالامتصاص والتبعثر والتأثيرات الهندسية كالانحناء والاقتران [22].



الشكل(2−9): آليات التخامد في الليف البصري[22].

2−6−1 الامتصاص، والتبعثر:

أولاً: الامتصاص:

تقسم آليات الامتصاص التي تحدث في زجاج السيليكا إلى الامتصاص الضمني والخارجي:

* **الامتصاص الضمني:** حتى أكثر أنواع الزجاج نقاوة سيمتص بشدة ضمن مناطق معينة من أطوال الموجات، وهذا ما يسمى بالامتصاص الضمني، وهو صفة طبيعية للزجاج. إن الامتصاص الضمني قوي جداً في المجال فوق البنفسجي ذي طول الموجة القصيرة $(\lambda < 0.4\mu m)$. يحدث ذلك نتيجة امتصاص إلكترون لفوتون، وانتقاله من حالة لأخرى. من الممكن أن يمتد الامتصاص فوق البنفسجي إلى المنطقة المرئية إلا أنها عموماً تقدم خسارة صغيرة جداً عند هذا المجال؛ لذلك تنعدم فوق البنفسجية عند استعمال الأنظمة الليفية.

تحدث ذروات امتصاص ضمني أيضاً في المجال تحت الأحمر البعيد $(\lambda > 7\mu m)$. يحدث الامتصاص نتيجة لتفاعل الفوتون مع جزيئة السيليكون (SiO_2)؛ مؤدياً إلى اهتزاز الرابطة $(Si - O)$. يقابل ذلك امتصاص الفوتون؛ أي خسارة في الطاقة الضوئية. تقع ذروات الامتصاص بين $7\mu m$ و $12\mu m$ لمركبات زجاج نموذجية بعيداً عن المنطقة ذات الاهتمام. لكن قد تمتد حواف الامتصاص نحو المنطقة من طول الموجة حيث تعمل الأنظمة الليفية، لكنها تبدي خسارة صغيرة عند الحدّ الأعلى من مجالنا $1.6\mu m$. حقيقة يمنع استعمال ألياف السيليكا بعيداً جداً عن طول الموجة هذا. نستنتج أن الخسارات الضمنية تكون غير مهمة في منطقة عريضة حيث يمكن أن تعمل الأنظمة الليفية، إلا أن هذه الخسارات تمنع امتداد الأنظمة الليفية نحو فوق البنفسجية، ونحو أطوال الموجة الأطول [24−26].

* **الامتصاص الخارجي:** تعد الشوائب المصدر الرئيس للخسارة في أي ليف عملي؛ نتيجة لتفاعل الضوء مع الشوائب في مادة السيليكا. يوجد نوعان من الشوائب مزعجان، هما: شوائب المعادن الانتقالية (Fe, Cu, Co, Ni, Mn) ، وشوائب شوارد الهيدروكسيد (OH^{-1}) .

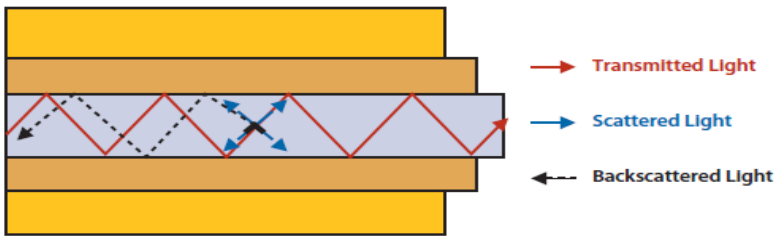
تتمتع شوائب المعادن الانتقالية بقوة امتصاص في المجال $(0.6\mu m - 1.6\ \mu m)$؛ لذلك يجب تخفيض نسبتها إلى بضعة أجزاء لكل بليون؛ للحصول على خسارة دون $1\ dB/km$. يتحقق ذلك باستعمال التقانات الحديثة للحصول على سيليكا ذات نقاوة عالية. أيضاً ومن من وجهة نظر عملية فإن الشائبة الأكثر أهمية التي يجب أن تخفض قيمتها إلى الحدّ الأدنى هي أيونات الهيدروكسيد OH^{-1}. تحدث الخسارات الأكثر أهمية عند $0.95\mu m$ و $1.24\mu m$ و $1.38\mu m$ عندما تكون OH^{-1} محتضنة في ليف سيليكا وهي المنطقة المعنية بالعمل. يمكن أن نلحظ ذروات امتصاص OH^{-1} على منحني خسارة الليف في الشكل(2−20). تتخذ احتياطات خاصة في أثناء تصنيع الزجاج لكي نضمن سوية منخفضة من تلك الشوائب في المنتج النهائي [24−26].

ثانياً: التبعثر:

* **تبعثر رايلي:** تتحرك الجزيئات عشوائياً في الزجاج في الحالة المنصهرة في أثناء التصنيع، وتقدم الحرارة المطبقة الطاقة لهذه الحركة. وعندما يبرد السائل تتوقف الحركة. وعند الوصول إلى الحالة الصلبة تثبت المواقع الجزيئية العشوائية داخل الزجاج، فينتج عن هذا تغيرات موضعية في الكثافة، ومن ثم تغيرات موضعية لقرينة الانكسار ضمن الزجاج. تمثل هذه التغيرات جسيمات مشتِّتة صغيرة مطمورة في مادة متجانسة أصلاً، وتكون قدود هذه الجسيمات أصغر بكثير من أطوال الموجة البصرية.

يبين الشكل(2−10) تشتت حزمة ضوئية عند مرورها في بنية ليفية مشتّتة. يتشتت جزء من طاقة هذه الحزمة بفعل هذه الجسيمات. يعرف هذا النوع من الخسارة بتشتت رايلي الذي يحدث عندما تنتشر موجة ما في وسط فيه جسيمات مشتّته أصغر بكثير من طول الموجة، حيث يتناسب تشتت رايلي مع $1/\lambda^4$ لذلك تتزايد أهميته باطراد تبعاً لتناقص طول الموجة [24−26].

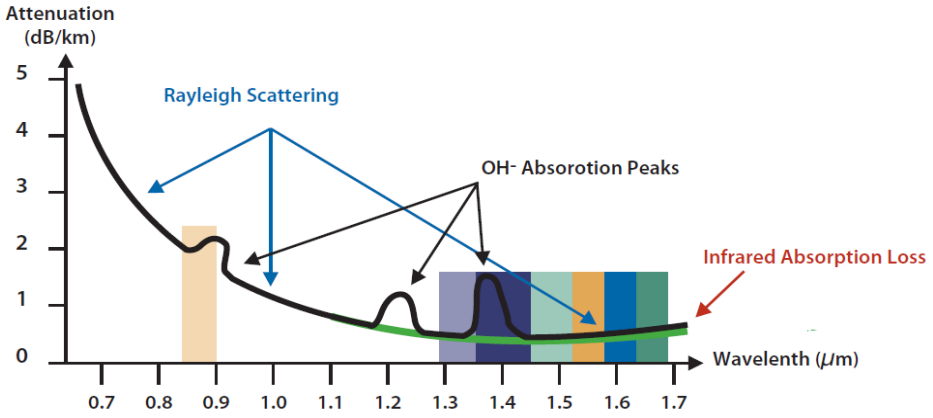
إن خسارات الكثافة هي خسارات ضمنية، ولا يمكن إزالتها بوساطة أي تقانة معالجة كانت. تعدُّ هذه الظاهرة الحدّ الأدنى الذي لا يمكن دونه تصنيع الليف من زجاج محدد.



الشكل (2−10): تشتت رايلي.

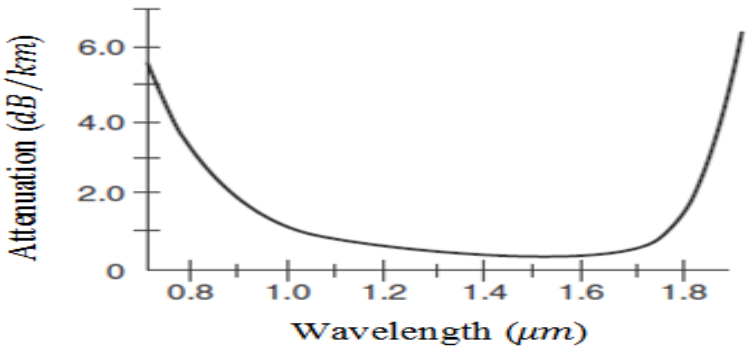
* **تشتت اللاتجانس:** إن اللاتجانس في المادة الذي يدخل في الزجاج عن غير قصد في عملية التصنيع يسبب أيضاً خسارات تشتت. فالمزج غير التام وانحلال المواد الكيميائية يمكن أن يسببا لا تجانساً في اللب. كما يمكن أن تنتج المعالجة الناقصة سطحاً بينيّاً خشناً. إن جسيمات التشتت في هذه الحالة تكون أكبر من طول الموجة على العكس منها في تشتت رايلي؛ لذلك فإن الخسارات التي تسببها الجسيمات الضخمة لا تعتمد على طول الموجة. يمكن التحكم بهذه الخسارات بتقانات تصنيع مناسبة [24–26].

يظهر الشكل(2–11) منحني التخامد الكلي لليف من الزجاج، نلحظ وجود قيمة دنيا للتخامد عند الطول الموجي 1550. نعزو التخامد عند هذه القيمة إلى تشتت رايلي حيث عند هذه القيمة من الطول الموجي تختفي آليات التخامد الأخرى؛ فضلاً عن ذلك نلحظ وجود قمتي امتصاص بالقرب من $1240\ nm$ و$1380\ nm$ عائدتين بصورة رئيسة لشوارد OH.



الشكل(2–11): التخامد بتابعية الطول الموجي[24–26].

مما سبق يمكن القول: أُزيلت الشوائب كاملاً، فإن قمتي الامتصاص تختفيان، ونحصل على قيمة منخفضة للتخميد ضمن المجال $(1250nm - 1650nm)$، فيصبح منحني التخامد كما في الشكل(2–12):



الشكل(2–12): منحني التخميد لليف خال تقريباً من شوائب OH.

لكن من أجل الأطوال الموجية أكبر $1.6\mu m$ تعود الخسارة للزيادة؛ نتيجة للامتصاص في المجال تحت الأحمر. عمومًا؛ ومن الشكل، ومن أجل مجال عمل الأنظمة الليفة يوجد نافذتان يكون فيها التخامد ذا قيمة منخفضة.

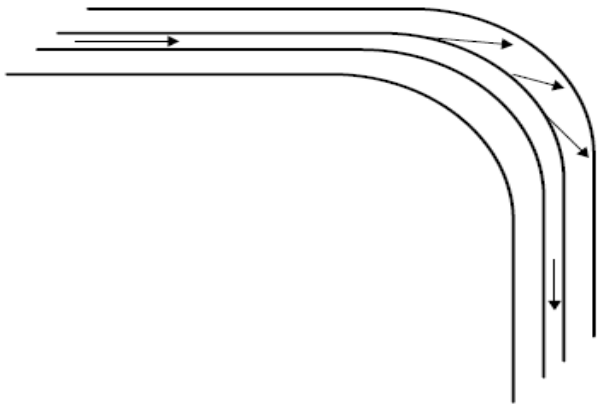
الأولى هي بالقرب من الطول $1300nm$ بتخامد أقل من $1\ dB/km$ حيث تكون المادة ذات تشتت صفري. والثانية بالقرب من $1550nm$ حيث يكون فيها التخامد أصغر ما يمكن بقيمة مساوية تقريباً لـ $0.2\ dB/km$. نظَّمنا نوافذ عمل الألياف المبينة في الشكل(2−12) في الجدول(2−3) أدناه [27−30,28].

الجدول(2−3): النوافذ الضوئية التي تعمل عندها الألياف البصرية:

Wavelength Band	Wavelength Range (nm)
O−band	1260−1360
E−band	1360−1460
S−band	1460−1530
C−band	1530−1565
L−band	1565−1625
U−band	1625−1675

2−6−2 التأثيرات الهندسية:

هناك نوعان من الانحناءات منها ما يرى بالعين المجردة، ومنها مجهري. يشير النوع الأول إلى الانحناءات ذات المقياس الكبير، مثل تلك التي تحدث عن قصد عند لف الليف على ملفات أو عند سحبه حول زاوية. يبين الشكل(2−13) الأشعة التي تنتشر ضمن الليف ، ففي منطقة الانحناء تصدم الأشعة المحصورة السطح البيني بزاوية أصغر من الزاوية الحرجة، فلا يحدث انعكاس داخلي كلي، و تنتشر الأشعة ضمن الغلاف. أي تحدث خسارة في طاقة النمط الموجّه.



الشكل (2−13): انتشار الأشعة في الغلاف في منطقة انحناء الليف.

هناك نوع آخر من الخسارة لا يرى بالعين المجردة؛ إذ يحدث الانحناء المجهري غالباً عندما يغلف الليف ضمن ناقل واقٍ. تؤدي الجهود الناشئة عند صناعة الناقل إلى تشوهات محورية صغيرة (انحناءات ميكروية) تظهر

عشوائياً على طول الليف؛ وهذا مما يؤدي إلى خروج بعض الضوء من الليف، فتتزايد بسبب هذا التأثير الخسارة في الليف بعد عملية تصنيعه في ناقل عما كانت عليه قبل تغليفه [24−26].

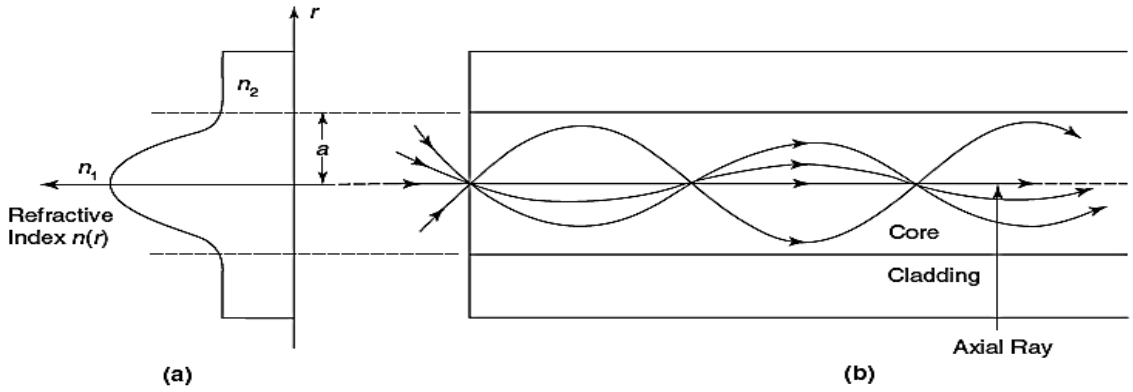
2−7 الألياف البصرية متدرجة قرينة الانكسار Graded Index Optical Fibers:

تُعدُّ الألياف المتدرجة تطويراً لبنية الألياف البصرية متعددة الأنماط درجية قرينة الانكسار. فبدلاً من تصنيع ألياف بقرينة انكسار نواة ثابتة، على العكس من ذلك تملك الألياف المتدرجة قرينة انكسار نواة تتغير تبعاً للبعد عن محور الليف حيث تأخذ قيمة عظمى n_1 عند $r = 0$ وتتناقص بصورة متدرجة لتبلغ قيمة دنيا n_2 عند $r = a$. نعبر عن هذا التغير بالعلاقة:

$$n(r) = \begin{cases} n_1\sqrt{[1 - 2\Delta(r/a)^{\gamma}]} & ; \quad r < a \\ n_1\sqrt{[1 - 2\Delta]} = n_2 & ; \quad r \geq a \end{cases} \qquad (13-2)$$

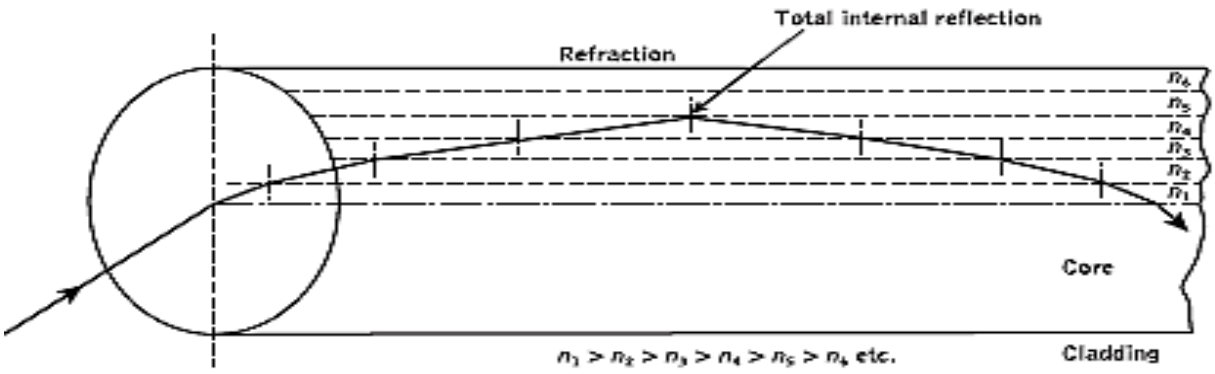
حيث γ معلمة ليفية تصف تغير المظهر الجانبي لقرينة الانكسار.

إن هذه البنية مبينة في الشكل(2−14)، وسنبين كيف يوجّه ليف الضوء بالتقاطه للأشعة، ولا يختلف عمله عن عمل ليف SI .



الشكل (2−14): ليف بصري متدرج قرينة الانكسار.a) شكل قرينة الانكسار،b) الأشعة المرسلة عبر الليف.

تنتشر الأشعة الضوئية في الليف بطريقة التذبذب المبينة في الشكل (2−14). يسبب التغير في قرينة الانكسار أن تتوجه الأشعة من جديد، وباستمرار نحو محور الليف، وتؤدي التغيرات الخاصة في المعادلتين إلى إعادة توجيه الأشعة دورياً. يمكن أن نوضح هذا التوجيه الجديد بتمثيل التغير المتواصل في قرينة الانكسار بسلسلة من التغيرات الدرجية الصغيرة كما يبينه الشكل (2−15). يمكن أن نصنع هذا النموذج بالدقة التي نريدها، وذلك بزيادة عدد الدرجات. ويشبه عددٌ من ألياف GRIN هذا النموذج الدرجي؛ لأن اللب يصنع على شكل طبقات.

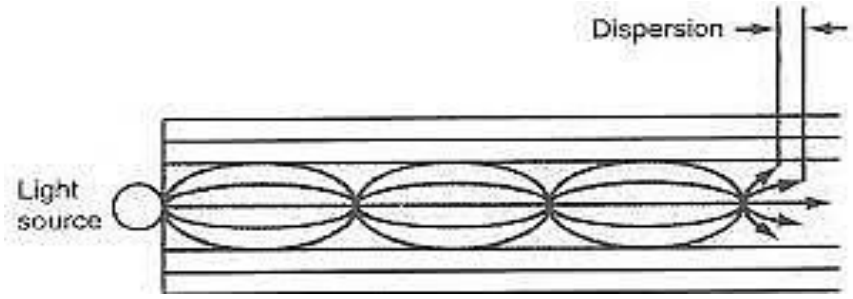


الشكل(2–15): نموذج درجي لليف متدرج.

يتبع انحناء الأشعة عند كل درجة صغيرة قانون سنيل ديكارت. وكما نعلم تنحني الأشعة بعيداً عن العمود عندما تنتشر من قرينة انكسار عالية إلى قرينة انكسار أصغر. إن شعاعاً يعبر محور الليف سيصدم مجموعة من حدود الفصل، وفي كل مرة ينتشر إلى منطقة ذات قرينة انكسار أصغر ينحني أكثر نحو المحور الأفقي. عند أحد حدود الفصل وبعيداً عن المحور تتجاوز زاوية الشعاع الزاوية الحرجة، وينعكس الشعاع كلياً عائداً نحو محور الليف. وينتقل الشعاع الآن من منطقة ذات قرينة انكسار منخفضة إلى منطقة ذات قرينة انكسار أعلى، وهكذا ينحني نحو العمود إلى أن يعبر محور الليف. عند هذه النقطة ستتكرر العملية.

تظهر ألياف GRIN تبدد تعدد أنماط صغيرة جداً، على الرغم من أنه تُثار جميع الأنماط في ليف GRIN تُنظم سرع المجموعة لمختلف الأنماط من خلال قرينة الانكسار المتدرجة؛ أي أن للشعاع الذي ينتشر وفق محور الليف قرينة انكسار كبيرة أي سينتشر بسرعة صغيرة، ذلك يعوض المسار القصير الذي يسلكه.

إن الأشعة التي تعبر المحور أفقياً تقريباً في الشكل(2–16) تعود بعد انتشارها مسافة قصيرة فقط بعيداً عن المحور. تبتعد الأشعة ذات الميل الأكبر عن المحور، وقد تنطلق بعض الأشعة بصورة عميقة؛ لدرجة أنها لن تعود مطلقاً. ولن تنحني بدرجة كافية لتتعرض لانعكاسات الزاوية الحرجة. إن هذه الأشعة لن تلتقط. ونرى الآن بأنه ستنتشر في ليف GRIN فقط الأشعة الواقعة ضمن زاوٍ محدود. لكل من ألياف GRIN وألياف SI هذه الخاصة المشتركة. يملك ليف GRIN فتحةَ نفوذ عددية، وزاوية قبول مرافقة لها.



الشكل(2–16): مسارات الأشعة على طول ليف GI/MMF [2,17,26].

اعتبرنا في الفقرة السابقة فقط الأشعة التي تثير الليف عند نقطته المركزية. لنفرض أن شعاعاً يدخل الليف بعيداً عن محوره. هذه الأشعة لا تنحني كثيراً لأنها تنتشر مسافة قصيرة فقط في اللب في الاتجاه العرضي. إذا دخل أحد هذه الأشعة بشكل أفقي تقريباً يمكن أن ينحني لدرجة كافية حتى يعاد توجيهه نحو المحور ويتابع مسيره في الليف. وعند زاوية دخول صغيرة نسبياً يكون الانحناء غير كاف لأن يخلق انعكاس زاوية حرجة وسيمر الشعاع إلى الغلاف. نستنتج أن زاوية الدخول التي تحقق أشعة ملتصقة تتناقص تبعاً لتحرك نقطة الإثارة بعيداً عن محور الليف. وبكلمات أخرى تتناقص زاوية القبول وفتحة النفوذ العددية تبعاً للبعد نصف القطري من المحور. إن هذا لا يشبه سلوك ليف SI الذي تبقى N_A ثابتة من أجله بغض النظر عن نقطة الدخول. لهذا السبب تكون كفاءة الاقتران لألياف SI عموما أكبر منها لألياف GRIN عندما يكون لكل ليف حجم اللب ذاته وتغير في قرينة الانكسار الجزئي ذاته [2,17,26].

الفصل الثالث

تقانات التجميع في الألياف البصرية

الفصل الثالث– تقانات التجميع في الألياف البصرية

Techniques for Multiplexing in optical fibers

3–1 مقدمة:

يفترض الطلب المتزايد على الخِدْمات عريضة المجال، مثل فيديو تحت الطلب – ألعاب الوسائط المتعددة على الشبكة– التحويل السريع للملفات من نقطة إلى نقطة، يفترض إيصال خدمات معدلات النقل العالية ليس فقط حتى مدخل منزل المشترك؛ وإنما أيضاً إلى داخله.

تستعمل الشبكات الداخلية "In door" حالياً أنواع متعددة من خطوط النقل :الأزواج المضفورة الكبل المحوري– وصلات أشعة تحت الحمراء في الفراغ الحرّ – وصلات WLAN IEEE 802.X....[31]

دُرِسَ كلُّ نوعٍ من أنواع الشبكات السابقة؛ ليؤدي خدمة معينة على نحوٍ أمثل، وهذا بدوره يؤدي إلى صعوبة إدخال خدمة جديدة على الشبكة وتعقيدها ، وتكوين عملية ربط بين الخِدْمات (على سبيل المثال بين الفيديو وخِدْمات المعطيات).

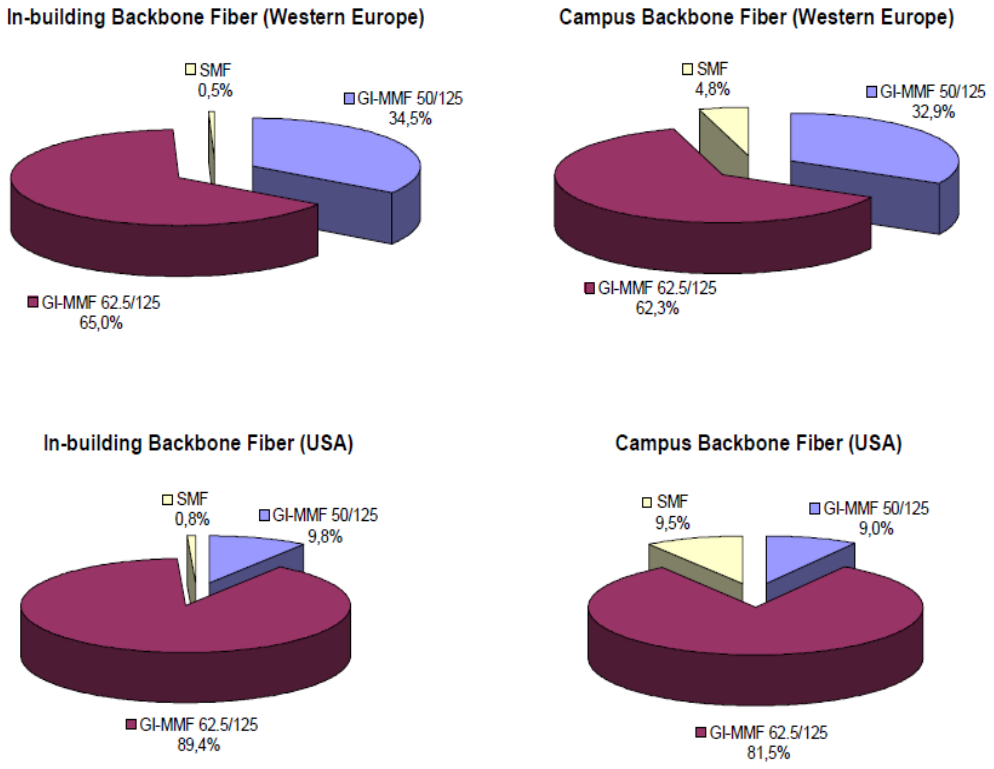
يكمن الحل الفاعل والجوهري في إيجاد شبكة توزيع واحدة فقط للخدمات المتعددة عريضة المجال؛ لتجمع بين كل الخِدْمات الموجودة، وإتاحة إمكانية إضافية، وتكامل خِدْمات جديدة على الشبكة حتى المستعمل النهائي[31].

يعدّ الليفُ الضوئي المرشح الأمثل لتنفيذ مثل هذه الشبكات عبر تقانات التجميع الضوئي المختلفة.

يمكن لهذا النوع من الشبكات الخاصة، وعلى مسافة تمتد حتى عدة كيلو مترات أن يغطي ليس فقط منزلاً صغيراً ؛ وإنما شقة ضمن بناء أو صالة في مطار أو مشفى ...

من أجل إرسال خِدْمات متعددة مختلفة (تملك معدلات نفل مختلفة، وأشكال إشارات مختلفة، ومتطلبات QOS متعددة) يجب إنجاز الدراسة المثلى للنسبة (فاعلية/ كلفة) لتقانة التجميع المقترحة باستعمال الليف MMF ،حيث يوجد عدد من تقانات التجميع لتصميم شبكة محلية باستعمال الليف الضوئي متعدد الأنماط من أجل تكامل الخِدْمات. أي وقع الخيار على شبكات MMF.

يبين الشكل (3–1) إحصائيات أنماط الألياف المستعملة في شبكات المناطق المحلية (LANs)، تبين هذه الإحصائيات أنماط استعمال الليف في أوروبا الغربية والولايات المتحدة الأمريكية عام 1999، يبين المخطط أن استعمال (SMFs) وجد في الحرم الجامعي في الولايات المتحدة ؛ ومع ذلك لم يتجاوز استعماله 10%. يبين هذا المخطط أن استعمال (MMFs) كان رائجاً مع قطر قناة يبلغ 62.5/125μm، وقد أمتدَّ طول الليف إلى عدة مئات الأمتار[32] .



الشكل (3-1): إحصائيات أنماط الألياف المستعملة في شبكات المناطق المحلية (LANs) [32] ..

يبين الجدول(3-1) نسب أطوال الليف البصري المختلفة المستخدمة في شبكات (LANs) في كل من أوربا الغربية، والولايات المتحدة الأمريكية والتي تراوحت بين 300m~1km حيث إن طول الليف لم يتجاوز 1km ؛ بنسب 90% و 85% في أوربا الغربية والولايات المتحدة الأمريكية على التوالي [33] .

الجدول (3-1) طول الليف البصري المستخدم في شبكات (LANs) في كل من أوربا الغربية والولايات المتحدة.

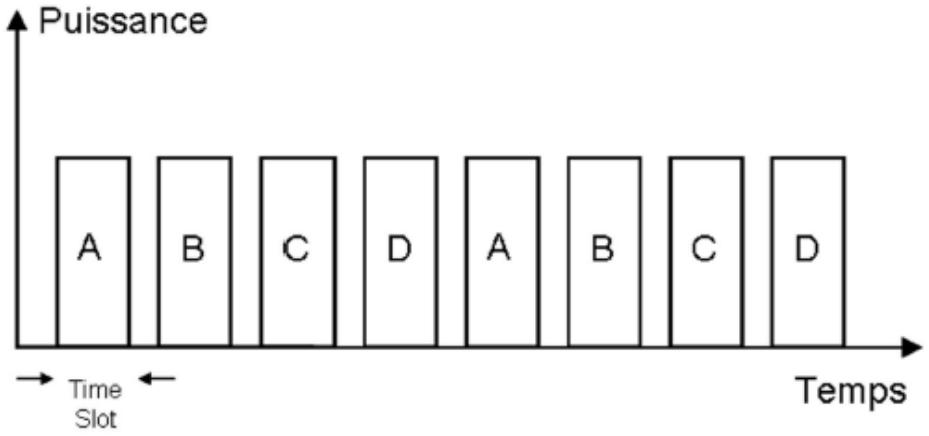
Area	In-building backbone	Campus backbone
Western Europe	< 300 m, 88%	< 1 km, 90%
USA	< 300 m, 84%	< 1 km, 85%

فُكّرَ جدياً بزيادة سَعَةِ أو قدرة النظام عن طريق إرسال موجات مستقلة ومختلفة على الليف نفسه ، وذلك للاستفادة القصوى من عرض حزمة أكبر لليف باستعمال تقانات تجميع مختلفة.

3-2 نظام التجميع بتقسيم الزمن بصرياً OTDMA:

يعتمد التجميع بتقسيم الزمن (OTDM: Optical Time Division Multiplexing) على تخصيص كامل عرض الحزمة الترددي لكل المشتركين، ولكن بصورة تتابعية .

يبين الشكل (3-2) عملية تقسيم محور الزمن إلى فترات زمنية متساوية تسمى بالفتحات الزمنية (time slote)، يرسل المشترك معطياته ضمن الفتحات الزمنية المخصصة له، و يسمح التجميع بتقسيم الزمن بعملية تجميع قنوات منخفضة معدل الإرسال؛ ضمن قناة واحدة بسرعة تدفق N مرة أكبر، حيث N عدد المستعملين للنظام.



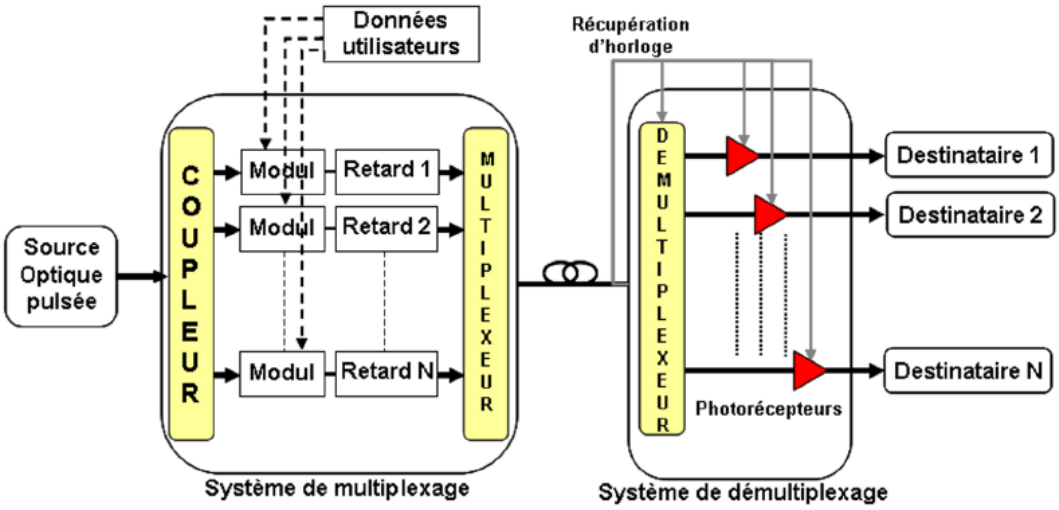
الشكل (3-2): "مخطط التجميع بتقسيم الزمن "[1,17].

تجدر الإشارة إلى عملية النفاذ بتقسيم الزمن يمكن تحقيقها بصرياً كاملاً؛ ومن ثمّ، وبالتالي نتكلم عن All optical" لتقانة التجميع TDM أي (OTDM: Optical Time Division Multiplexing) ونتكلم على (ETDM: Electrical time division multiplexing) عند تحويل الإشارة البصرية إلى كهربائية، إن استعمال تقانة ETDM يحدد من سرعة التدفق إلى 10Gb/s؛ بسبب العناصر والدارات الإلكترونية المستعملة التي لا تسمح بتجاوز معدل النقل المذكور آنفا. طُوّرت تقانة OTDM في بداية التسعينيات ؛ وهذا سمح بتجاوز معدل النقل السابق، والوصول إلى معدلات نقل من مرتبة Tb/s [1,17]

يوضح الشكل (3-3) مخططاً صندوقياً لجهاز الإرسال /الاستقبال يستعمل تقانة OTDM والتي تتكون من: جهة الإرسال، وفيها يسمح المنبع البصري بإرسال نبضات بصرية بعرض زمني Tc.

يستعمل معدل بصري لتعديل الإشارة البصرية بإشارة كهربائية بعرض Tb(التي تمثل معطيات المستخدم).

وتكون العلاقة بين Tc وTb من أجل N مستعمل Tb=N*Tc تتزامن إشارات المعطيات الكهربائية المرمزة (NRZ=Non Return Zero)؛ بفضل نظام تجميع مع قطار النبضات البصرية المطبقة بدورها على مدخل المعدل البصري ؛ حيث تخضع كل إشارة بصرية إلى عملية تأخير، ثم تُرسَل عبر ليف بصري.



الشكل (3-3): "مخطط صندوقي لجهاز إرسال /استقبال يستخدم تقنية OTDM.

في جهة الاستقبال، يقوم نظام فك التجميع باستعادة معطيات المشتركين عن طريق عزل النبضات البصرية الممثلة لمعطيات كل مشترك عبر عملية التحويل بصري/كهربائي. تتطلب استعادة معطيات المستعمل عملية تزامن مع معدل المعطيات المرسلة بعرض Tb.

تستعمل تقانة OTDM/ETDM في الشبكات(MAN(Mateporlian Aria Network وفي الشبكات LAN(Local Aria Network).

تجدر الإشارة أيضًا إلى أن تقانة التجميع هذه تستعمل في البنية التحتية لشركات الاتصالات، على سبيل المثال يستعمل نظام الحامل T1 في شمال أمريكا واليابان والذي يسمح بنقل ٢٤ قناة هاتفية أو ما يكافئها بمعدل نقل 64Kb/s على خط واحد بمعدل 1.5Mb/s.

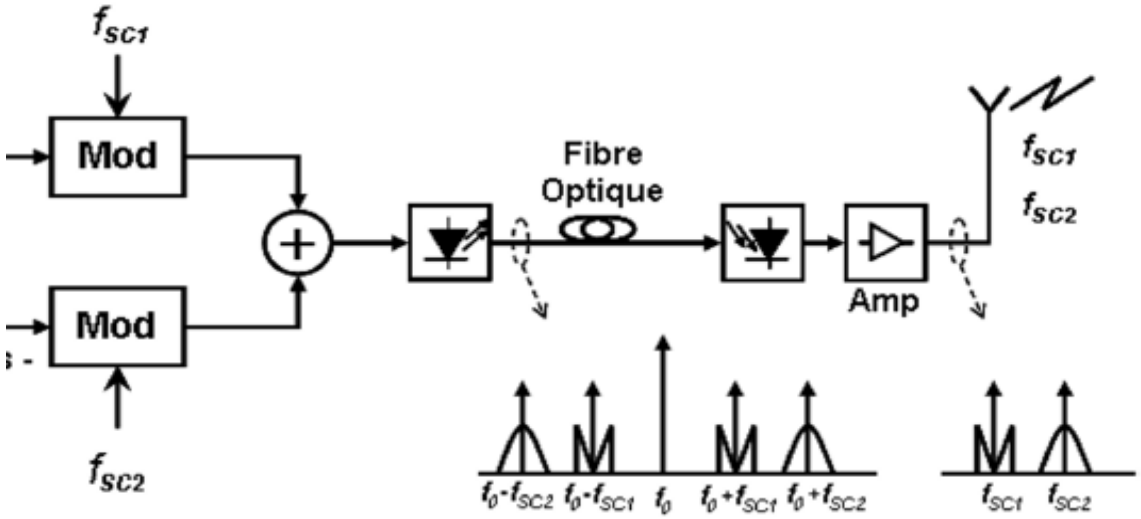
تعد الحاجة إلى توليد نبضات بعرض قصير إحدى أهم مقومات هذه التقانة. إن استعمال OTDM في الشبكات in-door باستعمال ليف بصري متعدد الأنماط يعد حلاً ، ولكنه يصطدم أيضاً بمشكلة التشتت النمطي لليف MMF الذي يسبب توسعاً ملحوظاً بعرض النبضة. يسبب التشتت النمطي وعدم التزامن في تقانة OTDM صعوبة باستعادة الإشارة.

3-3 نظام تجميع الحوامل الفرعية SCM:

تعد تقانة التجميع (SCM: Subscriber carrier multiplexing) طريقة فاعلة من أجل استعمال عرض نطاق الليف البصري بشكل أمثلي وتُستعملُ هذه التقانة في الاتصالات البصرية التمثيلية عامة ، وكذلك في أنظمة نقل الإشارة الراديوية عبر الليف البصري أي نظام (ROF :Radio Over Fiber).

في نظام التجميع SCM، تستعمل إشارة راديوية RF من أجل تعديل حامل بصري في جهة الإرسال؛ ومن ثم يحوي الطيف الترددي الحامل البصري الرئيس fo والحزمة الجانبية العليا fo+fsc والدنياfo−f sc حيث fsc تردد الحامل البصري، يُعدّل الحامل الراديوي بالمعطيات (التمثيلية أو الرقمية). [1,18]

يوضح الشكل (3−4) تقانة التجميع SCM باستعمال حاملين راديويين fsc1 و fsc2 .



الشكل (3−4): تقانة التجميع SCM [1,18].

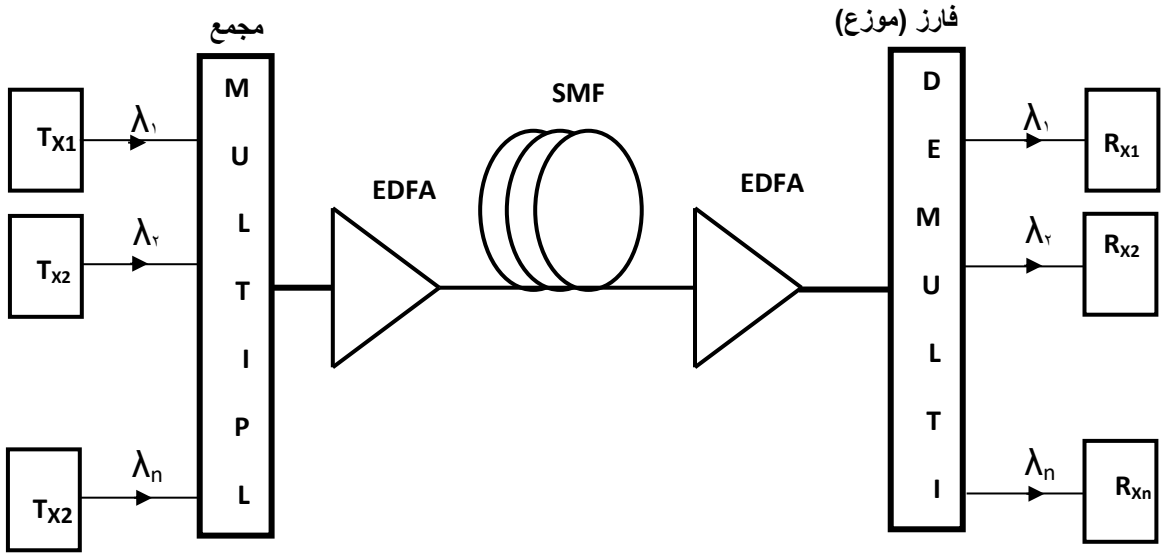
يمكن تجميع عدد من القنوات الراديوية على حامل بصري واحد، في جهة الاستقبال يستعمل الكشف المباشر من اجل الحصول على الحوامل الراديوية، تجدر الإشارة إلى أنه يمكن تعديل الحوامل الفرعية بطرق تعديل مختلفة ، وكذلك يمكن للمعطيات أن تكون بأنواع مختلفة؛ أي إن الحامل الراديوي fs1 يمكن أن يُعدّل بمعطيات رقمية في الوقت الذي يمكن أن يعدل فيه الحامل fs2 بمعطيات تشابهية ،علما بأن المعدل البصري المستعمل يمكن أن يكون من النوع المباشر أو من النوع الخارجي مثل MAZ.

3−4 التجميع بتقسيم طول الموجة (WDM):

ظهر جيل جديد للإرسال في بداية التسعينيات باستعمال التجميع بتقسيم طول الموجة Wavelength Division Multiplexing (WDM). ولدت هذه التقانة عن طريق فكرة حقن عدة إشارات رقمية لها نفس سرعة التعديل داخل ليف ضوئي بالوقت نفسه ، و لكن كل إشارة تملك طول موجة محدد (مختلف عن الآخر). يقوم جهاز الإرسال بتجميع (n) قناة بتدفق وسطي (D)؛ بينما يقوم جهاز الاستقبال بفرز الإشارة الكلية ذات التدفق (n*D) إلى n إشارة شكل (3−5).

سمحت التطورات السريعة جداً في التسعينيات في مجال أبحاث المضخات الضوئية بإنتاج مضخات ضوئية صرفة دون الحاجة إلى عملية تحويل الفوتونات إلى الكترونات ثم إعادتها من جديد الى فوتونات، استعمل هذا

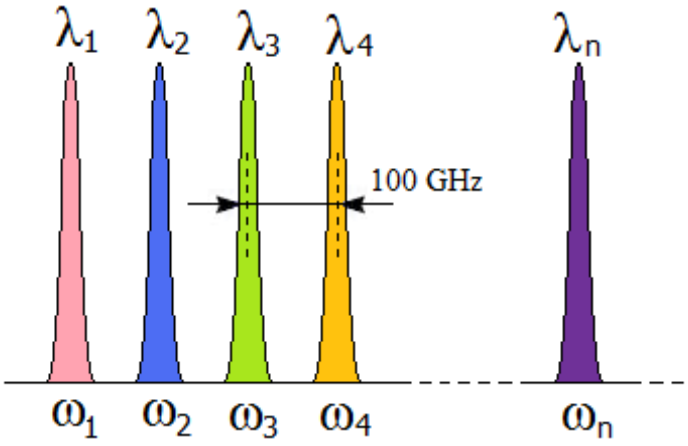
النوع من المضخمات في أنظمة التراسل لمسافات بعيدة جداً، حيث حلَّت بشكل كامل مكان المكررات الإلكترونية (Repeaters). إن إحدى أهم مواصفات المضخمات الضوئية المنشطة بعنصر الإربيوم النادر (EDFA: Erbium Doped Fiber Amplifier) أنها تعمل بصورة مستقلة عن معدلات الإرسال للإشارة الضوئية، و كذلك قدرتها على تضخيم عدد كبير من أطوال الموجة بالوقت نفسه ؛ وهذا يسمح بسهولة زيادة معدلات الإرسال لشبكات DWDM المنشورة مسبقاً [31,36].



الشكل (3-5): مخطط لنظام تجميع التقسيم، حسب طول الموجة WDM [31,36].

نظم اتحاد الاتصالات الدولي المجال الضوئي لنظام الاتصالات الضوئية متعددة الأقنية باستعمال المضخمات الضوئية ضمن نافذة تراسل للمعطيات تقع بين 1530nm و1565nm كذلك نظم اتحاد الاتصالات التباعد المسموح بين قناة وأخرى بالنانومتر(nm) أو بالغيغاهرتز (GHz)، و استناداً إلى هذا التقسيم صُنّف التجميع بتقسيم طول الموجة إلى عدة أنواع[31]:

- التجميع الخشن (Multiplexing CWDM: Coarse Wavelength Division) حيث تتباعد القنوات بمقدار 1.6nm أو 200GHz.
- التجميع الكثيف (DWDM: Dense Wavelength Division Multiplexing) بتباعد 0.8nm أو 100GHz شكل(3-6).
- التجميع عالي الكثافة (U-DWDM: Ultra-Dense Wavelength Division Multiplexing) بتباعد 0.4nm أو 50GHz ويمكن أن يصل التباعد أيضاً إلى (25GHz)0.2nm.



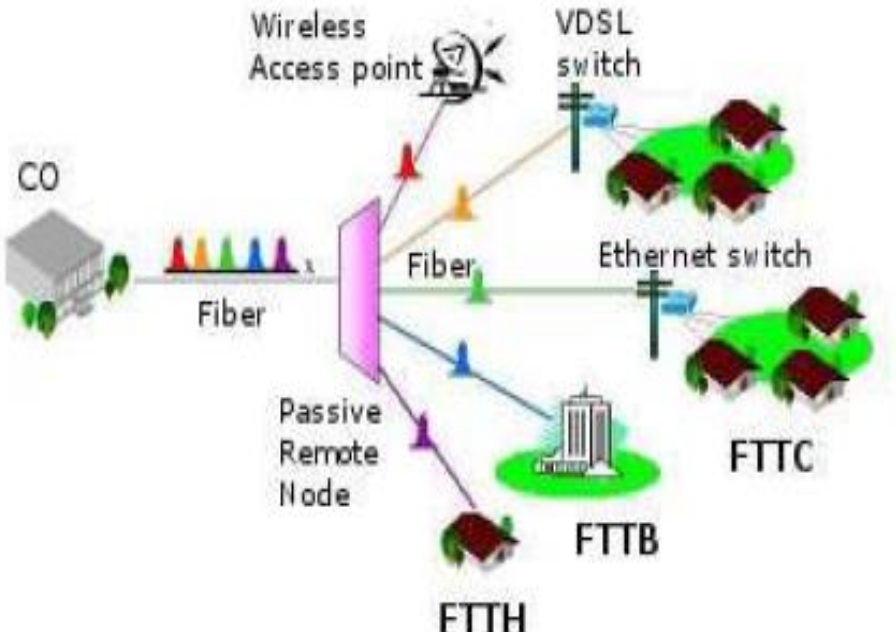
الشكل (3-6): التباعد الطيفي في حالة DWDM [31].

يمكننا حسب الاعتبارات الاقتصادية، و كذلك نمط شبكات النفاذ المتوضعة مسبقاً، واختيار نمط للنفاذ من بين عدة إمكانات متاحة (شكل(3-7)) وهي:

1 -FTTH(Fiber To The Home) حيث يصل الليف الضوئي حتى منزل المشترك؛ أي إن الإشارة تبقى بصرية ؛ وهذا يستدعي زيادة في الكلفة و الصيانة.

2-FTTB(Fiber To The Building) حيث يصل الليف الضوئي حتى مدخل العمارة.

3 -FTTC(Fiber To The Curb) حيث يصل الليف الضوئي إلى الرصيف (من أجل تخديم منازل عدة).

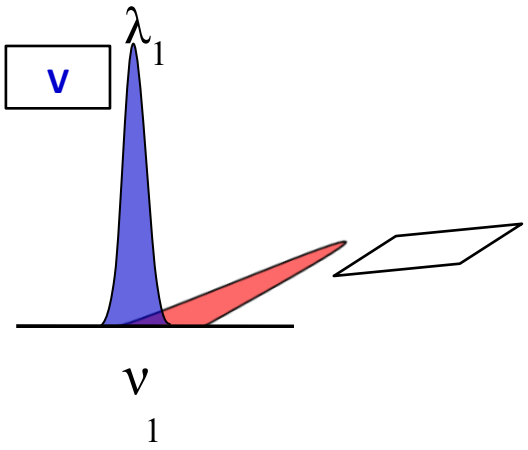


الشكل(3-7):أنواع شبكات النفاذ باستعمال تجميع التقسيم؛ حسب طول الموجة WDM [31].

3-5 التجميع بتقسيم الاستقطاب (PMD):

يستغل هذا النوع من التجميع الخاصية الشعاعية للأمواج الضوئية الموجهة داخل ليف ضوئي؛ و ذلك بالاستفادة من استقطاب الشعاع الضوئي. في هذا النوع من التجميع ومن أجل طول موجة ضوئية وحيدة ترسل قناة على المركبة الأفقية للشعاع الضوئي و قناة أخرى على المركبة الشاقولية في جهة الإرسال [36].

في جهة الاستقبال، تُفصّل المركبتان الأفقية و الشاقولية للشعاع الضوئي، يبين الشكل(3-8) مبدأ التجميع Polarization Mode Dispersion (PMD).

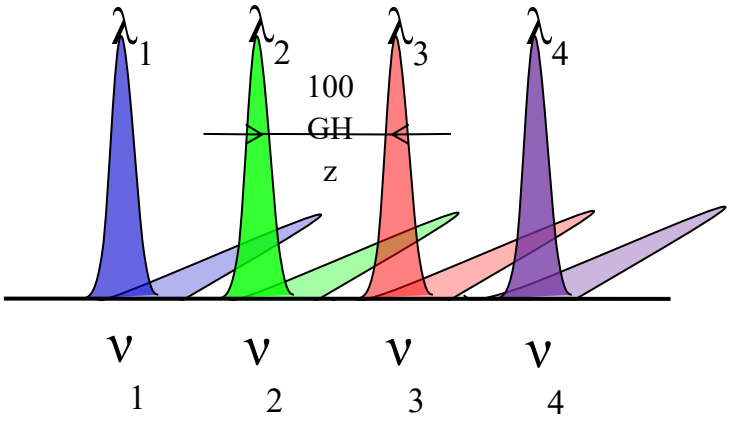


الشكل (3-8): مبدأ التجميع بتقسيم الاستقطاب [36].

3-6 التجميع المزدوج يتقسم طول الموجة وتقسيم الاستقطاب (WDM and PDM):

في هذا النوع الجديد من التجميع، يستعمل التجميع PDM لإرسال قناتين (بمعدل إرسال D لكل قناة) على طول موجة ضوئية λ_i باستعمال خاصية استقطاب الموجة الضوئية، ويستعمل بالوقت نفسه التجميع WDM من أجل إرسال N قناة على أطوال موجة ضوئية λ_i مختلفة حيث $(i=1.....N)$ بتباعد طيفي محدد من قبل اتحاد الاتصالات الدولي. [36]

يلحظ أن استعمال التجميع بتقسيم الاستقطاب هو حل فاعل جداً من أجل مضاعفة معدل الإرسال الكلي الذي يساوي $(2*N*D)$ عند استعمال التجميع المزدوج WDM و PDM الشكل(3-9).



الشكل (3-9): مبدأ التجميع بتقسيم طول الموجة و التجميع بتقسيم الاستقطاب معاً [36].

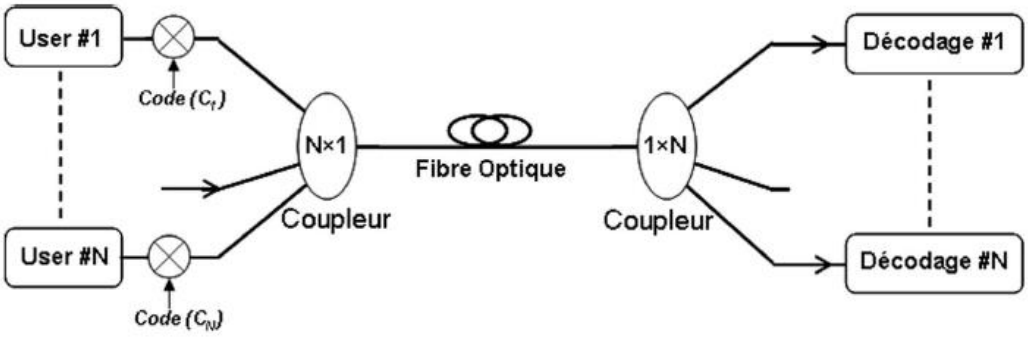
3-7 التجميع بتقسيم الكود أو الرمز بصرياً OCDMA:

يعتمد النظام (OCDMA(Optical Code Division Multiplexing Access المفاهيم نفسها المستعملة في نظام CDMA الراديوي. يسمح نظام OCDMA بإرسال معطيات المستعملين على عرض الحزمة نفسها، والوقت نفسه .

يرتكز النظام OCDMA على تخصيص كود خاص بكل مستعمل حيث يتكون الكود من سلسلة من الخانات السريعة تدعى Chips من أجل تمييزها عن خانات معطيات المستعمل، ويكون معدل النقل بعد الترميز عبارة عن جداء معدل النقل لمعطيات المستعمل بطول سلسلة الكود .

يسمح نظام التجميع بتقسيم الكود بنشر طيف الإشارة المرسلة بعرض L مرة أكبر من العرض الأساسي حيث L هو طول سلسلة الكود المستخدم. [20]

تتكون شبكات OCDMA من عدد N من المرسلات والمستقبلات، كما هو موضّح في الشكل(3-10):



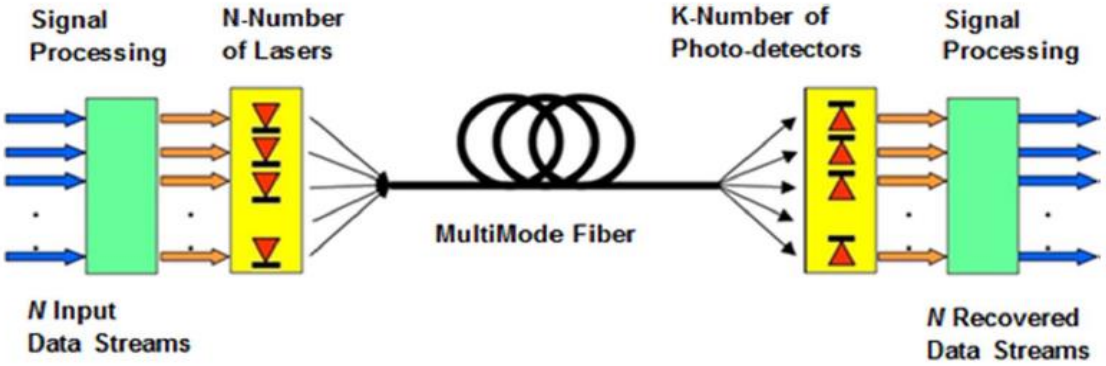
الشكل (3-10): سلسلة تراسل OCDMA [20].

تجدر الإشارة إلى أنه يوجد عددٌ من طرق ترميز المعطيات الثنائية وOCDMA الترددي.

3-8 تقنية التجميع MGDM:

يسمح التجميع في أنظمة الاتصالات بتعدد المستعملين بمشاركة وسط الإرسال نفسه. وتقانة MGDM هي تقانة تجميع تعتمد على الإدخال المكاني للإشارة ، وكشف مجموعة جزئية من الأنماط لخلق عدد من قنوات الاتصال المتوازية المستقلة عبر شبكة تستعمل الليف MMF.

هذه التقانة تشتق من التطوير الحالي لنظام الإرسال اللاسلكي المعروف ب (Bell Laboratories Layered Space-Time) (BLAST) والتي تُنتج لاستبدال شبكات WDM المتعلقة بشبكات LAN. يظهر الشكل (3-11) بنية MGDM.[38,39]



الشكل (3-11): بنية نظام ضوئي يستعمل تقانة التجميع MGDM [38,39].

في جانب المرسل يوجد n ليزر (مصدر ضوئي)، كل منها يستعمل لتحريض مجموعة مختلفة من الأنماط. التداخل النمطي يمكن أن يقلل عندما تستعمل المصادر n الضوئية المختلفة من أجل المجموعات النمطية المختلفة. على وجه خرج الليف MMF يوجد k مجموعة من الكواشف الضوئية تستجيب للمجموعات المختلفة من الاستطاعة الضوئية التي تحملها المجموعات النمطية n المختلفة، والناتجة عن مجموعة الإشارات n [40,41,42]. إن K إشارة مستقبلة ترتبط مع n إشارة مرسلة بمصفوفة الإرسال H(KXN)، والتي تمثل عناصرها الاستجابات لـ jth خرج من أجل ith دخل.

3-9 التجميع بتقسيم المكان:

يستعمل لنقل البيانات ، إما من خلال النحاس أو الألياف أو الأمواج الكهرومغناطيسية التي تحكمها معادلات ماكسويل في سياق كلاسيكي. تصف هذه المعادلات المجال الكهرومغناطيسي الذي يمكن أن يتغير عبر خمسة أبعاد مادية ، والتي يمكن استعمالها في التعديل وتعدد الإرسال.

البعد الزمني

عن طريق إنشاء سلسلة من الفواصل الزمنية، وتختلف داخل كل كمية عددية واحدة (مثل السعة أو المرحلة) من المجال الكهرومغناطيسي؛ وفقاً لنمط معين يسمح تشكيل رموز الاتصال. ثم تنتقل رموز الاتصال هذه في تتابع زمني بمعدل معين ، وتحمل في كثير من الأحيان أكثر من بت لكل رمز اعتمادًا على تعديل المطال المستعمل.

البعد التربيعي

تعدل عدد من أنظمة الاتصالات النبضات على موجة حاملة كهرومغناطيسية ترددها أكبر بكثير من معدل الرمز. خذ مثالاً على شبكات إدارة الطلب على المياه (WDM) التي تستعمل ترددات الموجة الحاملة البصرية في نظام 193 THz للموجة الحاملة البصرية وعروض نطاق التضخيم البصري في نطاق 5 THz؛ تفتخر هذه الأنظمة بعرض نطاق كسري صغير جدّاً حيث يمكن التفكير في المجال الكهرومغناطيسي بوجود مكونين مستقلين (جيب وجيب جيب التمام). يمكن عندئذٍ تعديل هذين المكونين ، وغالبًا ما يُسمَّيان التربيع ؛ لتشكيل أبجدية رمز ثنائي الأبعاد ، مثل تشكيل سَعَة التربيع (QAM) ، والذي يمكن عدّه في أبسط صوره كإشارتين PAM مضاعفتين للتربيع.

البعد الترددي

يُعرف إرسال إشارات اتصال متعددة بصورة متوازية على ترددات حامل مختلفة عبر وسيط الإرسال نفسه بتعدد الإرسال بتقسيم التردد (FDM) أو بتعدد إرسال تقسيم الطول الموجي (WDM) في سياق الاتصالات البصرية. تتطلب ترددات الموجات الحاملة تباعدًا بينهما ، والذي يجب ألا يقل عن معدل الرمز المستعمل في كل موجة حاملة بحيث يمكن فك تشفير إشارات QAM متعددة الإرسال بصورة فردية دون التداخل المتبادل. على وسيط مشترك بطبيعته (على سبيل المثال ، القناة اللاسلكية المتنقلة) ، تكون قابلية توسيع نطاق أنظمة FDM محدودة عادةً بسبب قيود النطاق الترددي التنظيمي ، في حين أن القيود المادية أو الهندسية الأساسية تضع مثل هذه القيود على أدلة الموجات (على سبيل المثال ، المحورية ، الزوج الملتوي ، أو الألياف الكابلات).

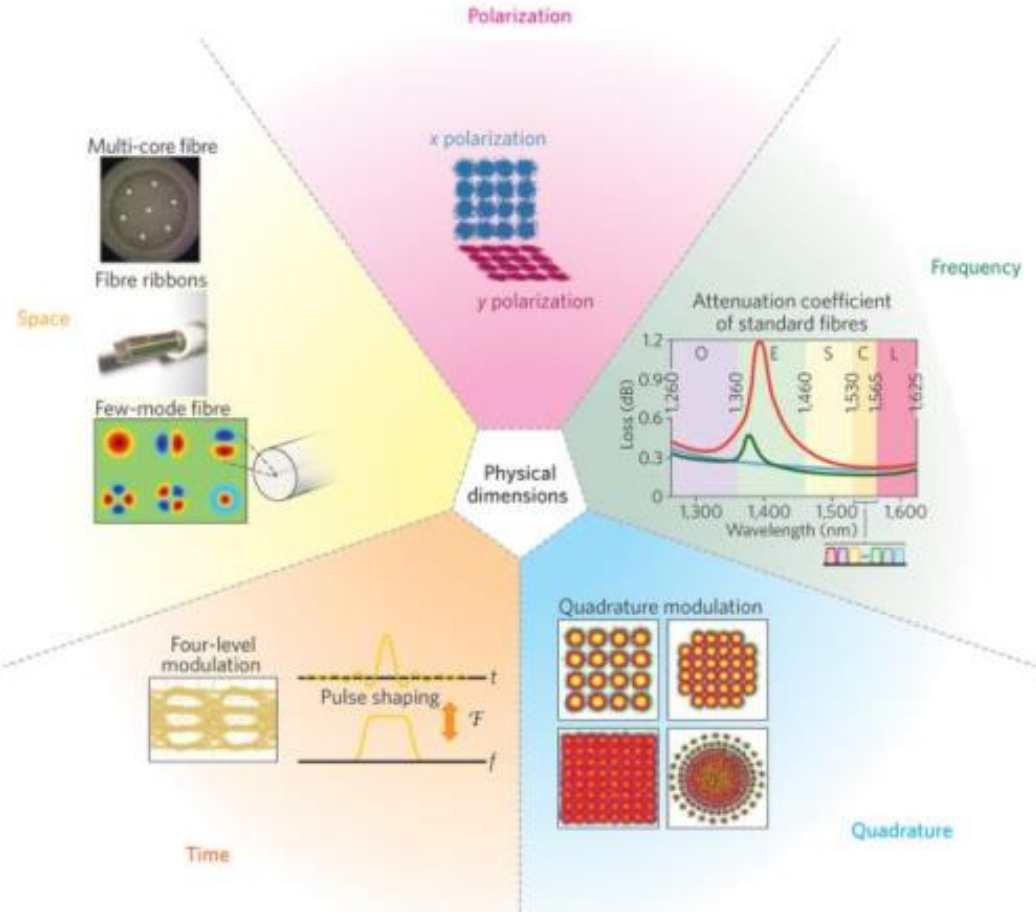
البعد الاستقطابي

في بعض التطبيقات ، مثل الاتصالات الضوئية المتماسكة ، يمكن استغلال الطبيعة الاتجاهية للموجات الكهرومغناطيسية؛ لنقل دفق معلومات مستقل في وقت واحد على مجموعة من استقطابين متعامدين. مضاعفة تقسيم الاستقطاب (PDM) يضاعف قدرة الإرسال؛ مقارنة بنظام الاستقطاب الفردي ؛ ومع إدخال الترابط بين الرموز في الاستقطابين ، أصبح من الممكن إنشاء تنسيقات التعديل رباعي الأبعاد ، والتي يمكن تصميمها؛ لتحسين أداء الإرسال بتكلفة الكفاية الطيفية [34].

البعد المكاني

يُستغلُّ البعد المكاني عن طريق إرسال المعلومات عبر مسارات مكانية متوازية مختلفة. يستلزم ذلك مجموعة واسعة من التقانات عبر عدد من قطاعات الاتصالات ؛ بدءًا من حافلات البيانات على لوحات الدوائر المطبوعة إلى تقانات الهوائيات المتعددة الأكثر تعقيدًا في الأنظمة اللاسلكية الخلوية.

في السنوات الأخيرة ، ركَّزت أبحاث الاتصالات البصرية على الألياف ذات النوى المتوازية المتعددة داخل الغلاف المشتركة (MCFs) وكذلك على "الألياف ذات النمط القليل" ، والتي تدعم أنماطًا مكانية متعددة مستقلة للضوء (الأنماط) عبر مناطق النوى. يتمثل أحد التحديات التي تواجهها هذه الأنظمة ، وكذلك مع عدد من الأجهزة الأخرى سواء الكهربائية أو البصرية ، في وجود تداخل بين المسارات المكانية المتوازية. بينما في بعض التطبيقات يمكن معالجة هذا التداخل المتبادل بإلغاء التداخل وتقانات معالجة الإشارات الرقمية متعددة المدخلات والمخرجات المتعددة ، فإن هذه الرسالة سوف تستغل تصميمات الدليل الموجي منخفضة التداخل.



الشكل (3–12) : الأبعاد المادية للتعديل وتجميع الأمواج الكهرومغناطيسية [3].

3-10 الشبكات البصرية غير الفعّالة PON :

الشبكة البصرية غير الفعّالة: هي شبكة توفر بطبيعتها مجموعة متنوعة من خِدْمات النطاق العريض للعملاء من خلال الوصول إلى الألياف الضوئية حيث يسمح PON بإزالة جميع المكونات النشطة بين الخادم والعميل من خلال إدخال مكونات سلبية ضوئية لتوجيه حركة المرور عبر الشبكة. عنصره الرئيس هو المقسم البصري.

يمكن أن يقلل استعمال الشبكات غير الفعّالة من التكاليف، ويستعمل بصورة أساسية في شبكات FTTH. على النقيض من ذلك ، فإن عرض النطاق الترددي ليس مخصصًا ، ولكنه يتضاعف في ليف واحد في نقاط الوصول إلى الشبكة. باختصار ، هذه شبكة تكوين من نقطة إلى نقاط عدة.

بالانتقال من الشبكة إلى العميل ، يمكن القول إن بنية PON تتكون من المعدات الآتية : محطة الخط البصري (OLT) في المكتب المركزي لمزود الخدمة، وعدد من وحدات الشبكة الضوئية (ONUs) أو محطات الشبكة الضوئية (ONTs) قريب من العميلين النهائيين.

1- **محطة الخط البصري**(Optical Line Terminal):

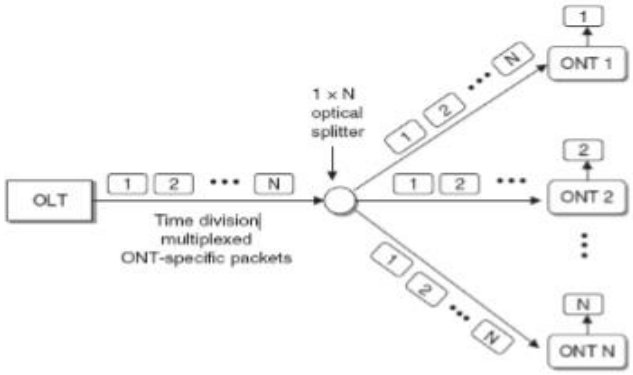
يقع OLT في مكتب مركزي ويتحكم في التدفق ثنائي الاتجاه للمعلومات عبر ODN (شبكة التوزيع البصري). يجب أن يكون OLT قادرًا على دعم مسافات الإرسال عبر ODN التي تصل إلى20 km(حاليّاً يمكن أن يكون أكثر مع EDFA) اتجاه downstream ، تتمثل وظيفة OLT في استقبال حركة الصوت والبيانات والفيديو من شبكة طويلة المدى وبثها إلى جميع وحدات ONT على ODN، أما في الاتجاه العكسي (المنبع) ، يقبل OLT، ويوزع كل حركة المرور من مستعملي الشبكة [55].

2- **محطة الشبكة الضوئية**(Optical Network Terminal):

يقع ONT مباشرة في مقر العميل حيث الغرض منه هو توفير اتصال بصري لـ PON على الجانب العلوي والتواصل كهربائياً مع معدات العميل على الجانب الآخر. اعتمادًا على متطلبات الاتصال للعميل أو مجموعة المستعملين ، يدعم ONT عادةً مزيجًا من خدمات الاتصالات ، بما في ذلك معدلات Ethernet المختلفة

باختصار ، يمكننا القول إن ONT هي عناصر قادرة على تصفية المعلومات المرتبطة بمستعمل معين من OLT. لديهم أيضًا وظيفة تغليف معلومات المستعمل، وإرسالها نحو رأس OLT لإعادة توجيهها إلى الشبكة المناسبة.

يتلقى كل ONT جميع الإشارات المرسلة من خلال رأسه المقابل ONT ، مثل باقي أجهزة ONT في المرحلة نفسها . تُنقل معلومات OLT عن طريق البث TDM ، وتصل إلى جميع ONT على حد سواء. ومع ذلك ، فإن ONT لديه مهمة تصفية المعلومات التي توجّه بنفسه فقط (في فترة زمنية معينة).



الشكل (3-13): يوضح بيانياً عملية مضاعفة تقسيم الوقت:

3- **المقسم** Spliter:

المقسمات عبارة عن فواصل طاقة سلبية تسمح بالاتصال بين OLT و ONT الخاص بهم الذين يخدمون. ومع ذلك ، فهي ليست مخصصة فقط لإشارات تعدد الإرسال أو إزالة تعدد الإرسال ، ولكنها تجمع أيضًا بين الطاقة، فهي أجهزة توزيع بصرية ثنائية الاتجاه بإدخال واحد ومخرجات متعددة:

• الإشارة التي تدخل من منفذ الإدخال (الوصلة الهابطة) تنطلق من OLT، وتنقسم بين منافذ الإخراج المتعددة.

• الإشارات التي تدخل من المخارج (الإرسال) تأتي من ONT وتدمج عند المدخل.

حقيقة كونها عناصر سلبية تمامًا ، فهي تتيح لهم العمل دون طاقة خارجية ؛ وهذا يقلل من تكلفة النشر والتشغيل والصيانة. إنهم يقدمون فقط فقد الطاقة الضوئية على إشارات الاتصال المتأصلة في الطبيعة.

هذه المقسمات مسؤولة عن تلقّي المعلومات من OLT، وإرسال جميع المعلومات إلى جميع مخرجاتها. بمجرد وصول المعلومات إلى ONTs ، سيتمكن كل منها فقط من معالجة حركة المرور التي تنتمي إليها ، أو التي يمكن الوصول إليها من قبل المشغل ، وذلك بفضل تقانات الأمان AES (معيار التشفير المتقدم). في هذا الإجراء ، يستعمل بروتوكول البث TDM (تعدد الإرسال بتقسيم الوقت) ، وإرسال المعلومات إلى كل مستعمل في أوقات مختلفة.

يحتوي OLT على فترات زمنية مختلفة محددة مسبقًا ، كل منها يتوافق مع مستعمل معين. لذلك ، في وظيفة كل جزء زمني ، يقوم ONT لكل مستخدم بتصفية المعلومات الموجهة إليه.

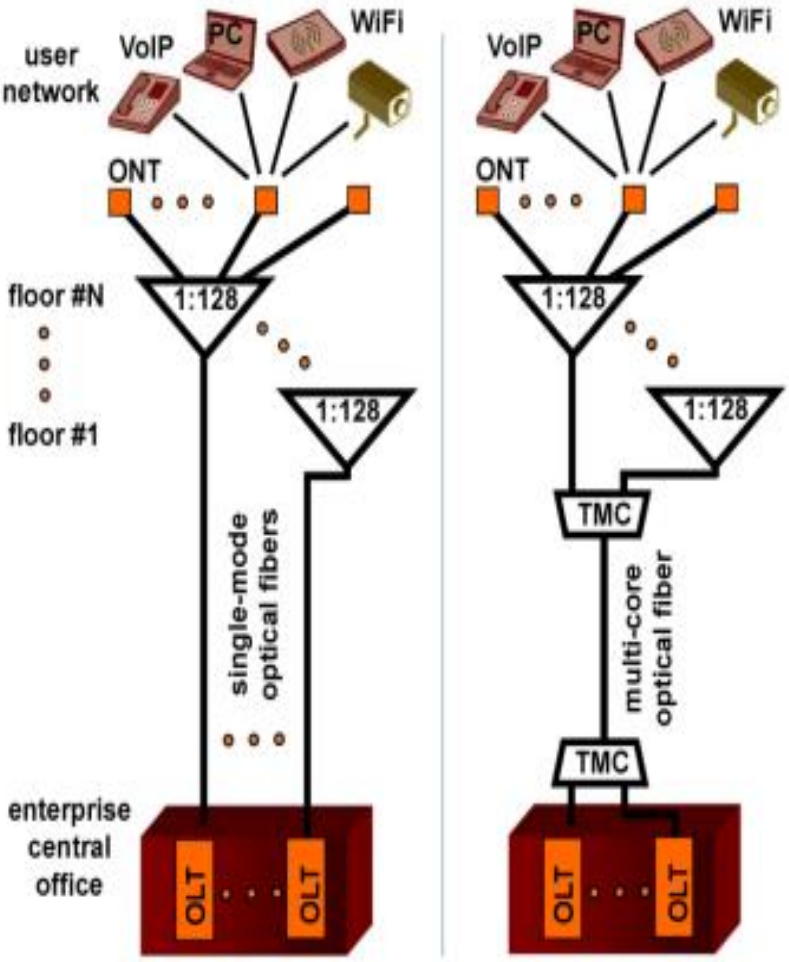
أحد الجوانب المهمة التي يجب مراعاتها هو الطول الموجي (λ) الذي ينقل OLT المعلومات إلى ONT حيث تختلف هذه الأطوال؛ وفقًا لما إذا كان فرع الشجرة أو اتصال ONT يحتوي على ليف واحد أو ليفين.

الجدول (3-2) : مزايا pon وعيوبها

Network Type	Positive Aspects	Negative Aspects
Point-to-Point	• High capacity	• High cost of deployment
Active Point-to-Multipoint (AON)	• High capacity	• High cost of deployment • High cost of operation and maintenance
Passive Point-to-Multipoint (PON)	• High capacity • Use of passive elements (lower investment) • Low cost of operation and maintenance • Flexibility and scale • All services in a fiber • ITU G.983.3 standardization	• Protection methods required against sabotages • High impact on breakdown at central OLT

3-11 استعمال ألياف متعددة النوى في شبكة المنطقة المحلية:

- توفر زيادة في كثافة الألياف، وزيادة في عدد المستعملين النهائيين
- الهيكل السداسي هو تكوين أسهل بكثير في التصنيع والتعامل مع الشبكة الضوئية.
- يُستعمل موصل MCF المدبب (TMC) لتعدد الإرسال، وإلغاء الإرسال المكاني للإشارات الضوئية .



الشكل (3-14): مقارنة بين شبكتين إحداهما تستخدم MCF وأخرى تستعمل SMF [60].

الجدول(3-3): مقارنة بين الألياف متعددة النوى والليف وحيد النواة [60]:

type of cable deployed in the trunk of GPON LAN	number of power splitters in the remote node[a]	number of potential users	
		in the case of a 1:64 power splitter	*in the case of a 1:128 power splitter*
single-core, single-mode, fiber-optic cable	1	64	128
two-core, single-mode, fiber-optic cable	2	128	256
three-core, single-mode, fiber-optic cable	3	192	384
four-core, single-mode, fiber-optic cable	4	256	512
five-core, single-mode, fiber-optic cable	5	320	640
six-core, single-mode, fiber-optic cable	6	384	768
seven-core, single-mode, fiber-optic cable	7	448	896

- استعمال الألياف متعددة النوى (MCFs)مع 10و 16 نواة ؛ موزعة مع عملية أحادية النمط في الطيف المرئي [61].
- استعمال الألياف متعددة النوى ضمن الحساسات الحيوية القائمة على رنين البلازمون للكشف عن أنواع بكتيريا حيث يكون الحساس المقترح من ألياف فيها سبع نوى مرتبة في شكل سداسي ومقسمة بألياف أحادية النمط (SMF)للكشف الفاعل [62].

الفصل الرابع

الألياف متعددة النوى

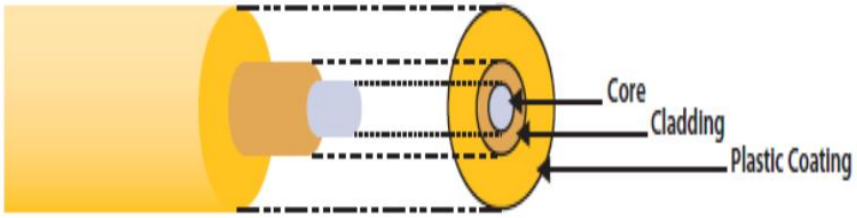
Multi core fiber

الفصل الرابع– الألياف متعددة النوى

Multi core fiber

4–1 البنية ، المبادئ وميزات الألياف الضوئية أحادية النمط:

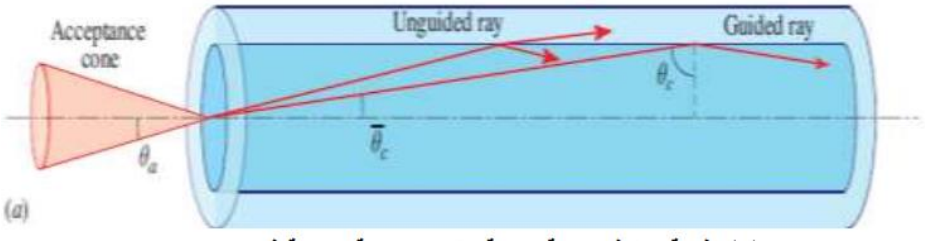
يبين الشكل (4–1) البنية الهندسية للألياف الضوئية التي هي عبارة عن أسطوانات من الزجاج متحدة المركز، وتتكون من جزء مركزي (القلب – النواة) له قرينة انكسار n_1 ، وغلاف يحيط به قرينة انكساره n_2 حيث $n_1 > n_2$ وتشكل هاتان الطبقتان دليل الموجة الذي يوجّه الضوء وفق محوره حيث تغطى هذه المنطقة التي تؤدي دوراً أساسياً في توجيه الضوء بطبقة واقية للحماية [50] .



الشكل (4–1) :بنية الليف الضوئي [50].

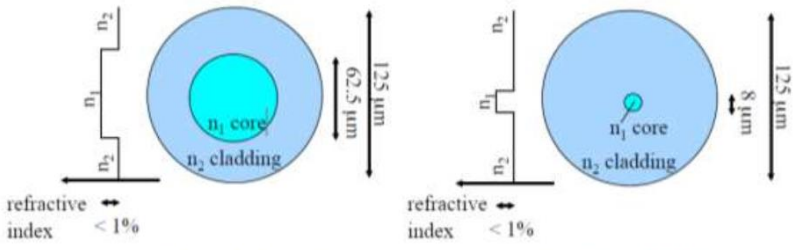
تصنع الألياف الضوئية عادة من السليكا، فهي مادة شبيهة بالزجاج، وتتكون من السيليكون والأكسجين، ولها الصيغة الكيميائية SiO_2 ويتواجد هذا المركب في الطبيعة على شكل بلورات، مثل الكوارتز حيث حالياً وبفضل التقنيات المتطورة يمكن للمرء أن يمدّ كبلاً ضوئياً قطره10 cm بطول 150 km فعندما يدخل الضوء إلى الليف بزاوية محددة، فإنه يخضع لانعكاس داخلي كلي متكرر، وينتشر ضمنه وفق مسار متعرج ليصل إلى نهايته دون خسارة. ويبين الشكل (4–2) فتحة النفوذ العدديةNa (Numerical aperture)والتي تعرف بأنها أقصى زاوية دخول للضوء إلى الليف كحد أقصى حيث تُقاس بالنسبة لمحور الليف؛ وبذلك يمكن للضوء أن يوجّه دون خسارة [51] ولها الصيغة الآتية:

$$N_A = \sin \theta_a = (n_1^2 - n_2^2)^{1/2} \qquad (4–1)$$



الشكل (4–2) فتحة النفوذ العددية وزاوية القبول والزاوية الحرجة في الليف الضوئي[51] .

لذلك فإن أي ضوء يرد ضمن دائرة نصف قطرها يقع خارج مخروط القبول سوف ينكسر على السطح البيني ، فيمر عبر الغلاف، ويضيع. فالأشعة الضوئية التي تدخل إلى النواة بزاوية أكبر أو تساوي الزاوية الحرجة θ_c هي التي تنعكس انعكاساً كلياً تُوجَّه ضمن الليف حيث يبين الشكل(4-3) نوعي الألياف الضوئية، فإذا كان قطر النواة كبيراً نسبياً(50-85 µm) يمكن أن ينتشر ضمن الليف أكثر من نمط فنحصل على ليف متعدد الأنماط (Multi-Mode Fiber)، ويستعمل هذا النوع من الألياف في الشبكات المحلية التي تمتد لبضعة كيلومترات فقط ، وتنقل هذه الألياف البيانات باستعمال الضوء الصادر عن الديود الضوئيLED) ضمن المجال (850-) 1300nmوعلى العكس من ذلك إذا كان قطر النواة صغيراً؛ مقارنة بالطول الموجي، فإنه يسمح بانتشار نمط واحد فقط، ويكون في هذه الحالة ليفاً ضوئياً أحادي النمط(SMF) ذي قطر نواة صغير بحدود 9µm ويوفِّر نقل البيانات عن طريق الليزرات التي تصدر الأطوال الموجية 1300nm و 1550nm والمضخمات الضوئية التي توضَع على مسافات منتظمة من الليف [50,52,53] .



الشكل (4-2) مقارنة بين الليف أحادي النمط والليف متعدد الأنماط.

وتتميز الألياف الضوئية باثنتين من البارامترات[51] :

• الفرق النسبي بين قرينتي الانكسار (refractive index difference) : له قيمة نموذجية، ويعطى بالعلاقة

$$\Delta = (n_1 - n_2)/n_1 \qquad (2-4)$$

• التردد المقيّس المعياري V :

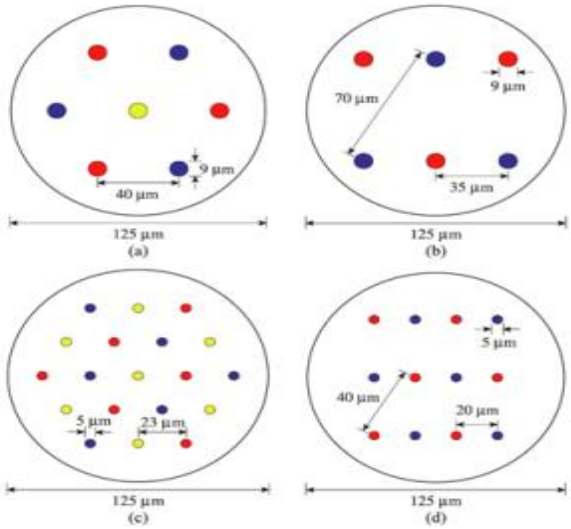
$$V= (2\pi/\lambda_0)*a*(n_1^2 - n_2^2)^{1/2} \qquad (3-4)$$

حيث a نصف قطر النواة، λ_0 الطول الموجي في الخلاء ، n_1 قرينة انكسار النواة، n_2 قرينة انكسار الغلاف

4-2 الألياف متعددة النوى (MCF) :

صُنّع MCFs أول مرة بوساطة Fukazawa Electric في عام 1979، وتتكون من بنية تشتمل على عدة نوى ضمن غلاف واحد.

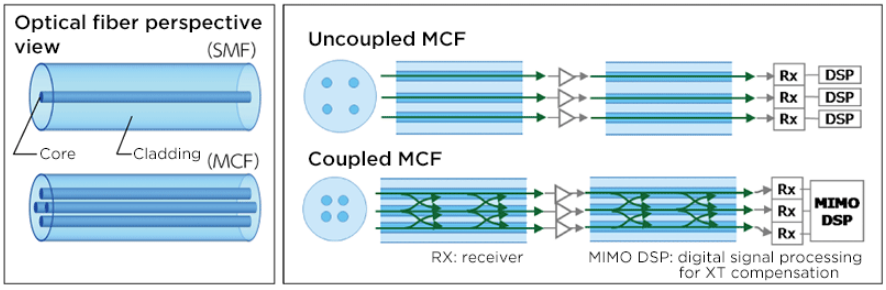
مكّن التقدم الحديث في تكنولوجيا التصنيعMCF التي تدعم السعة الكبيرة والانتقال لمسافات طويلة من خلال اعتماد بناء هولي حيث يُعدُّ الحدّ من XT هي القضية الرئيسة في MCF فقد طُوّر عدد من الطرق لتقليل التداخل المتبادل من خلال التخطيط الأساسي غير المتجانس، والنتيجة شبه المتجانسة المحتملة والبناء المعزز بمحاكاة الشكل كما يبين الشكل(4-4) حيث يوضّح لنا المسافة بين النوى، وكذلك قطر النواة، وذلك يتغير حسب عدد النوى ضمن الغلاف حيث استُعمل التصميم الأخير في دراستنا [49].



الشكل (4-4) الحدُّ من التداخل المتبادل بين النوى في MCF: (a) – (d) تخطيط غير متجانس[49] .

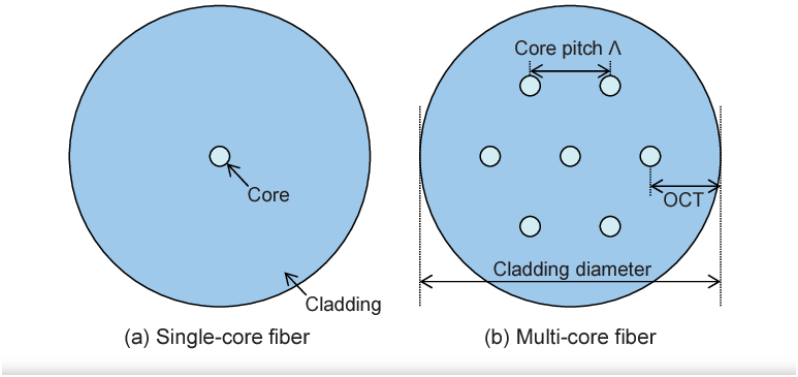
هناك نوعان من الألياف ذات 10 قنوات مكانية أو أكثر : أحادي النمط (SM-MCF) و(FM-MCF) حيث تحقَّق هذه الزيادة في القنوات المكانية ببساطة عن طريق زيادة قطر الغلاف؛ ومع ذلك فإنه سوف يقلل من القوة الميكانيكية والموثوقية على المدى الطويل؛ لذلك لا يزال البحث عن حل عملي ومثالي حيث يعدُّ SM-MCF أسهل بكثير في تحقيق انتقال سعة كبيرة لمسافة طويلة؛ لأن الانتشار أحادي النمط مستقر، وتنعكس الزيادة في العدد الأساسي مباشرة على السَّعَة الإجمالية.

في الوقت الحاضر يُعدُّ MCF موضوعاً مهماً لإمكاناته الواعدة في تحسين كفاية التجميع بتقسيم المكان SDM ويمكن تصنيف MCFs إلى ألياف من النوع المقترن وغير المقترن كما يوضّح الشكل (4-5)حيث النوع الأول يستعمل عدداً من النوى الموضوعة بطريقة تسمح للنوى بالاقتران مع بعضها بعضاً [43].



الشكل (4-5) الفرق بين النوع المقترن والنوع غير المقترن لليف متعدد النوى[43].

حيث تتطلب الـ MCFs من النوع غير المقترن أن يتم ترتيب كل نواة على نحوٍ صحيح داخل الألياف؛ للحفاظ على تداخل متبادل منخفض بين النوى انخفاضاً بما يكفي للسماح بتطبيقات الإرسال لمسافات طويلة.



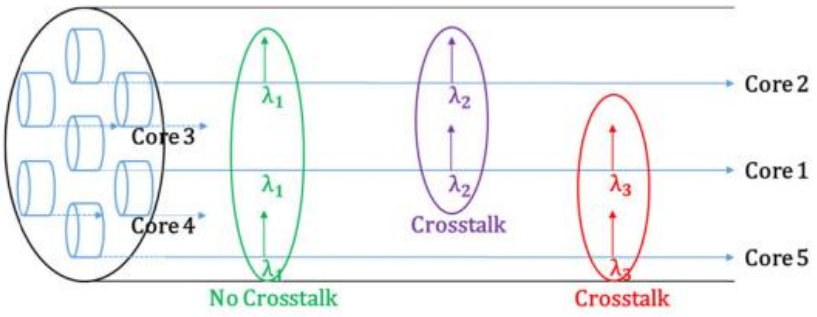
الشكل (4-6): يبين شكل الليف متعدد النوى[43].

كما يعتمد عدد النوى المراد وضعها داخل هذه الألياف على معايير التصميم التي تؤخذ في الحسبان حيث لا يمكن أن تكون المسافة بين النواة الخارجية، وحافة الغلاف الخارجية أصغر(outer cladding thickness) من 30μm، كما يبين الشكل (4-6)؛ وذلك لتقليل خسارة الانحناء الجزئي.

وتُعدُّ المسافة بين النوى (core pitch) المحدد الرئيس الذي يحدد مستوى التداخل بين النوى بحيث إذا كانت المسافة بين النوى أكبر من سبعة أضعاف نصف قطر النواة أو يساويها، يدعى هذا التصميم من الألياف بالنوع غير المقترن حيث تعدُّ الـ Core pitch و OCT و Cladding diameter البارامترات الأساسية لليف متعدد النوى، كما هو مبين في الشكل (4-6).

4-3 التداخل المتبادل (cross talk):

التداخل المتبادل: هو تداخل الحقل الكهربائي أو المغناطيسي لإحدى النوى مع نواة أخرى مجاورة، كما يبين الشكل (4-7)حيث يحدث تداخل الإشارات في الغالب عندما تنتقل الإشارات ذات الأطوال الموجية نفسها في النوى المجاورة [46].



الشكل (4-7) مثال على التداخل المتبادل في MCF [46] .

حيث يمكن إهمال التداخل بين إشارتين تحملهما أطوال موجية مختلفة أو منتشرة على النوى غير المتجاورة ، وقد يقلل التداخل المتبادل من جودة الإشارة، ويسبب فقد المعلومات حيث يُعدُّ تقليلُ التداخل المتبادل مهمة شاقة، ولكن إذا لم يُنفَّذ فسوف يمنع الألياف من تحقيق أقصى إمكاناتها من حيث الأداء والسعة، لذلك لكي يُتعامَل مع التداخل المتبادل على نحو صحيح هناك حاجة إلى طريقة دقيقة لتقديره في الألياف متعددة النوى حيث توجد طريقتان للقيام بذلك: نظرية النمط المقترنCoupled-Mode Theory (CMT) ونظرية الطاقة المقترنة Coupled-Power Theory (CPT).

نظرية النمط المقترن (CMT): يمكن استعمال هذه الطريقة لتحليل خصائص انتشار أدلة الموجة في حين أنَّ هذه الطريقة تسمح بتقدير دقيق للتداخل المتبادل؛ مع مراعاة تأثيرات الالتواء والانحناء التي تتعرض لها الألياف إلا أنَّ هناك حاجة إلى عدد كبير من عمليات المحاكاة لتقدير قيمة التداخل المتبادل.

نظرية الطاقة المقترنة (CPT): من ناحية أخرى يعتمد على مبدأ قياس مقدار الطاقة التي تنقلها الإشارة التي تُرسَلُ في نواة واحدة إلى نواة أخرى مجاورة، وعلى عكس CMT فإن CPT قادر على تقديم تقدير سريع ودقيق للتداخل المتبادل بين النوى في MCFs عن طريق حساب متوسط تأثيرات الانحناء واللف على طول الألياف؛ باستعمال طول ارتباط محدد مسبقًا.

باستعمال نظرية CPT يمكن تقدير حجم التداخل بين اثنتين من النوى داخل ليف بطول : L

$$XT = \tan h\ (h_{mn}\ L) \quad (4-4)$$

علاوة على ذلك إذا كان التداخل المتبادل صغيرًا جدّاً فيمكن تقريبه

$$XT = h_{mn}\ L \quad (5-4)$$

$$h_{mn} = (2 * K_{pq}^{2} * R_b) / \beta * \Lambda \quad (6-4)$$

حيث h_{mn} : هو متوسط pcc بين النواتين m و n .

حيث يعطى التداخل بين نواتين :

$$XT=(2*K_{pq}^{2}*R_b*L)/\beta*\Lambda \qquad (7-4)$$

حيث إن :

β: ثابت الانتشار ، R_b نصف قطر الانحناء ، K_{pq} معامل اقتران النمط ، Λ: المسافة بين النوى ، L : طول الليف.

يعطى K_{pq} بالعلاقة الآتية [44] :

$$K_{pq}=[(U_1^{2}*\sqrt{\Delta})/a_1*V_1^{3}*K_1^{2}(W_1)]*\{[(\pi*a_1)/W_1*\Lambda]*\exp[(-W_1*\Lambda)/a_1]\}^{0.5} \quad (8-4)$$

$$V_1= k*a_1*n_1(2\Delta)^{1/2} \quad ، \quad U_1^{2} = a_1^{2}*(k^{2}*n_1^{2}-\beta^{2}) \quad ، \quad W_1^{2}= a_1^{2}*(\beta^{2}-k^{2}*n_0^{2})$$

حيث إنَّ : k: العدد الموجي ، $K1_{w1}$ تابع بيسل المعدل من النوع الثاني والدرجة الأولى.

a_1 نصف قطر النواة ، Δ الفرق النسبي بين دليل انكسار النواة والغلاف.

يعطى تابع بيسل بالعلاقة الآتية [45]:

$$K_1(W) = (\pi/2*W)^{1/2} * e^{-w}\{1+3/8w[1-(5/2*8w)(1-(21/3*8w))]\} \quad (9-4)$$

يجب أن نلحظ أيضاً أن التداخل المتبادل الذي قدمته العلاقة (4-7) هو متوسط التداخل المتبادل بين نواتين وليس أسوأ حالة تداخل متبادل حيث في MCFs الفعلية تحتوي كل نواة عامّة على عدة نوى متجاورة، ويتأثر بجميع النوى الأقرب. إذا كانت جميع النوى تحمل قوة إشارة متساوية، فإن أسوأ حالة تداخل للنوى الداخلية أكبر من النوى الخارجية، نظرًا لأن عدد النوى المجاورة الأقرب أكبر للنوى الداخلية. على سبيل المثال في حالة HCPS تحتوي النواة الداخلية على ست نوى مجاورة أقرب، في حين أن النوى الخارجية لديها ثلاثة نوى مجاورة . [47]

أسوأ تداخل متبادل (XT worst) يعطى بالعلاقة الآتية [48] :

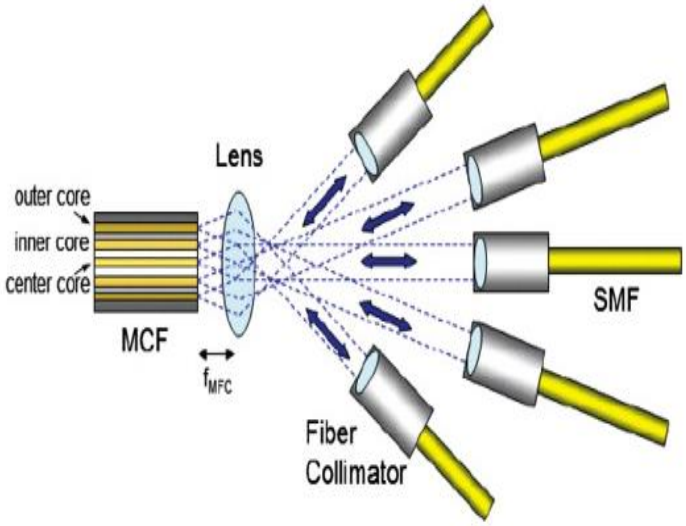
$$IC-XT_{worst} = IC-XT + 10*\log(n) \quad (10-4)$$

حيث IC-XT هو التداخل المتبادل بين نواتين متجاورتين في [dB] و n هو عدد النوى المجاورة.

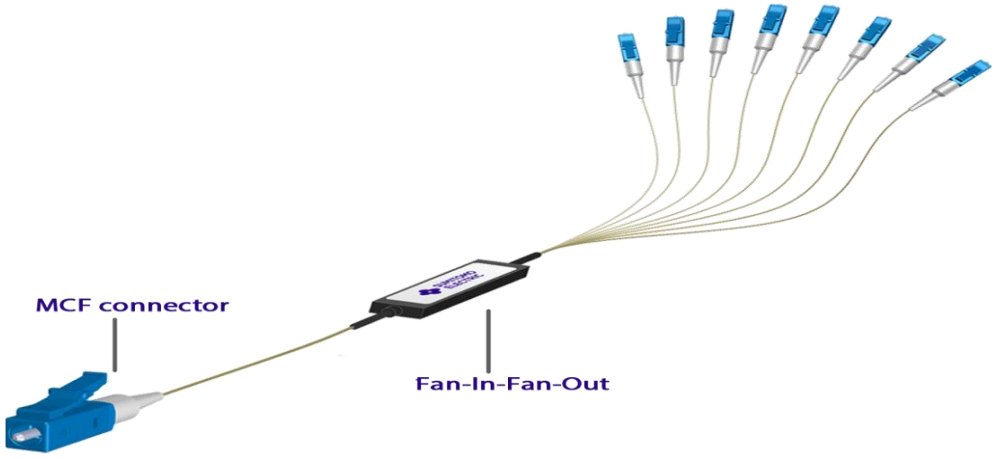
4-4 كيفية حقن الإشارة في MCF:

يحتوي نظام النقل MCF على جهاز (F_{in} / F_{out}) للاستفادة من كل نواة في MCF حيث تتمثل وظيفة جهاز FI / FO في الجمع الفاعل بين الضوء من كل نواة من MCF إلى SMFs الفردية والعكس صحيح.

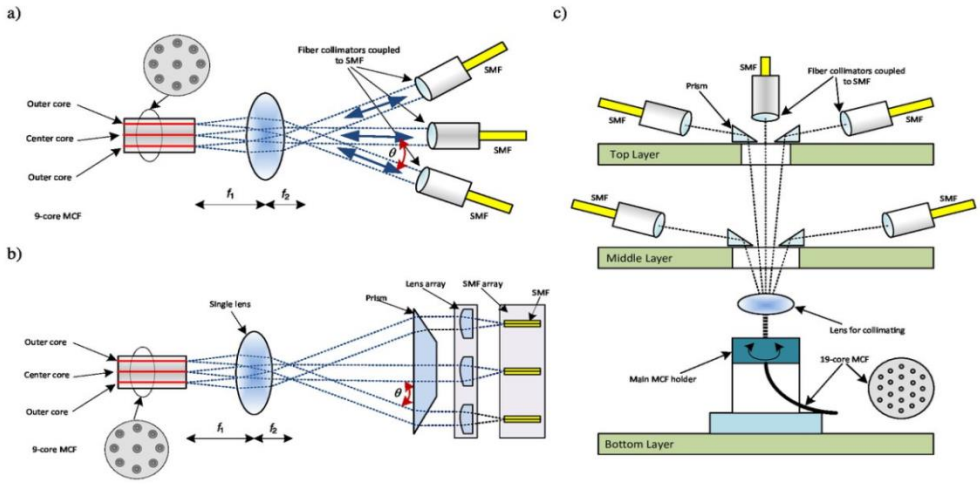
تحوّل العدسة المفردة الموضوعة أمام MCF إلى حزمة من الحزم المتوازية التي تنتشر كل منها في اتجاه مختلف قليلاً. بافتراض وجود مسافة بين النوى تبلغ 35µm وبُعد بؤري f_{MCF} يبلغ2mm ، فإن أشعة النواة الداخلية والخارجية سوف ينتشران بزاوية مخروطية ° 1 و ° 2 ، على التوالي؛ ومن ثم يكون الانتشار على مدى بضعة سنتيمترات كافياً لفصل الحزم مكانياً [63].



الشكل (4-8): يبين كيفية حقن الإشارة في الألياف [63].



الشكل (4 -9) طريقة الربط بين الألياف متعددة النوى والليف وحيد النواة[63] .



الشكل (4–10): كيفية حقن الإشارة في MCF [63] .

الفصل الخامس

النتائج والمناقشة

النتائج والمناقشة:

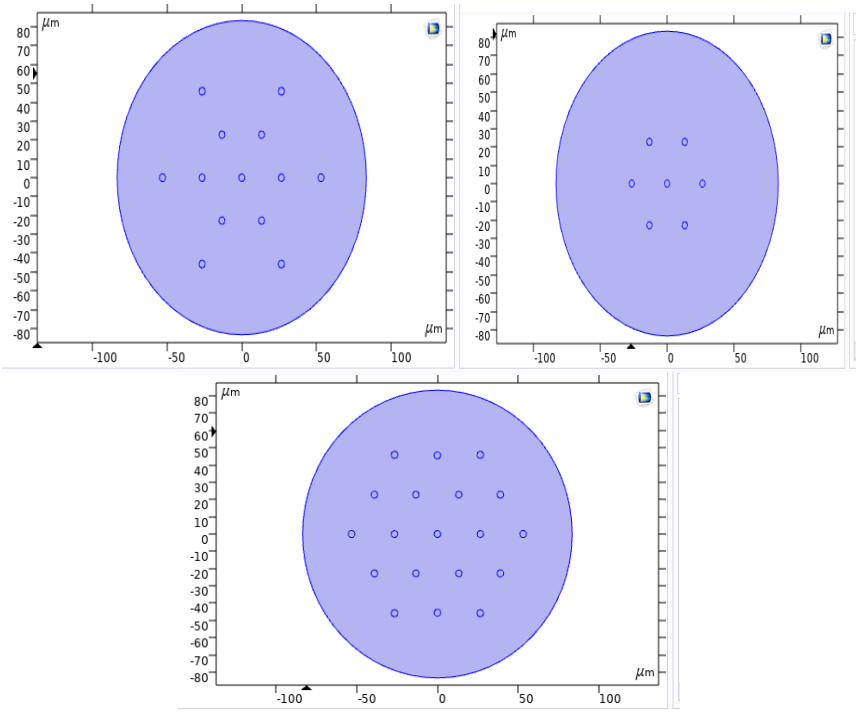
5-1 تصميم MCF باستعمال COMSOL :

توجد طرق لا حصر لها لتنظيم النوى داخل SM-MCF مثل وضعها في حلقات سداسية بالنظر إلى أن التداخل المتبادل يتأثر بشدة بالمسافة بين النوى؛ لذلك فإن الطريقة المنطقية عند تصميم المخططات هي زيادة المسافة بين النوى المجاورة . وفي ضوء هذا المنطق نُظِرَ في نظرية تعبئة الدائرة، وعلى الرغم من أن نظرية التعبئة الدائرية التي تنص على أن التعبئة الأكثر كثافة للدوائر المتماثلة في المستوى هي الشبكة سداسية لقرص عسل النحل حيث بالتموضع السداسي تُنظَّم النوى في حلقات مختلفة ، وكلها ذات شكل سداسي، والطريقة التي نضيف بها النوى إلى هذا التصميم أكثر تعقيدًا مما قد يتصور المرء، حيث لا يمكن إضافة الحلقات ببساطة إلى الألياف حتى تسمح القيود الفيزيائية للألياف ؛ نظرًا لأن بعض النوى في الحلقة نفسها قد تختلف في المسافة إلى النواة المركزي ، وهذا يعني أنه بعض النوى قد تتلاءم مع الألياف؛ بينما بعضها الآخر لا و لهذا السبب أُضيفت النوى إلى الألياف ، فإنها تشترك جميعًا في نصف القطر نفسه حيث تبنى حلقات في مراحل واحد ، اثنين ، ثلاثة وأحياناً أكثر.

في البداية يُوضَع سبع نوى في الألياف، حيث إن جميع النوى الست التي تتكون منها الحلقة الأولى لها نصف القطر نفسه ثم نقوم ببناء جزء من الحلقة الثانية عن طريق إضافة تلك النوى الأقرب إلى المركز، وهكذا حتى نحصل على التصميم النهائي (19 نواة) كما يبين الشكل (5-1) حيث توضح المحاور نصف قطر الغلاف والمسافة بين النواة الخارجية وحافة الغلاف الخارجية أنه لا يمكن أن تكون أصغر (OCT) من 30 µm بحيث نحصل على بنية سداسية حيث استعملت البارامترات كما يبينها الجدول الأتي :

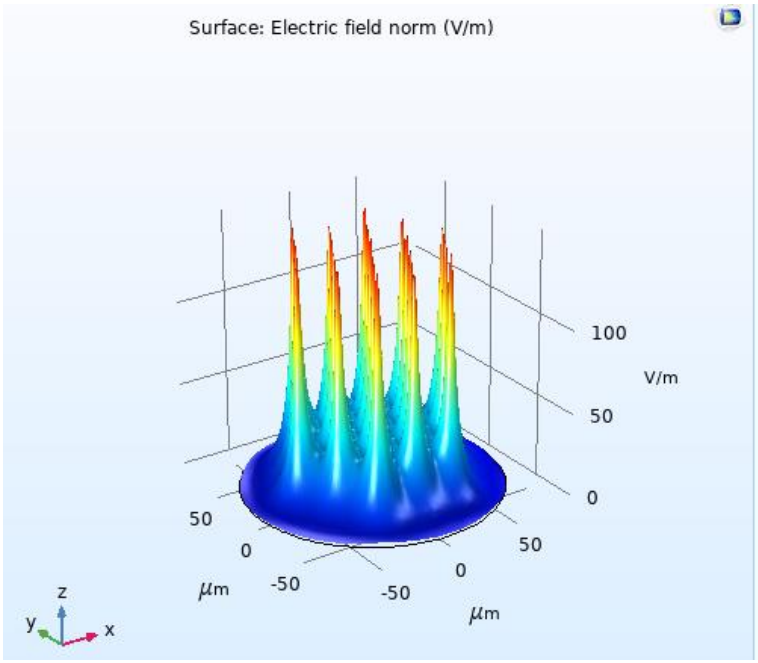
الجدول (5-1): البارامترات المستعملة في تصميم الليف.

Cd	167[μm]	Cladding diameter	قطر الغلاف
a	2[μm]	Core radius	نصف قطر النواة
Fiber radius	83.5[μm]	Fiber radius	نصف قطر الليف
Rmax	53[μm]	The largest circle radius	نصف قطر الدائرة الخارجية
λ	1550nm	Wavelength	طول الموجة
Δ	0.27%	Refractive index difference	الفرق النسبي بين قرينتي الانكسار
v	0.87<2.405		تردد القطع المعياري
n1	1.455	Core refractive index	دليل انكسار النواة
λc	0.56μm	Cutoff	طول موجة القطع
n2	1.451	Cladding refractive index	دليل انكسار الغلاف
Λ	26.5[μm]	Core pitch	المسافة بين النوى



الشكل (5-1): يبين مراحل تصميم الليف (بنية الليف بالنسبة لنصف قطر الغلاف).

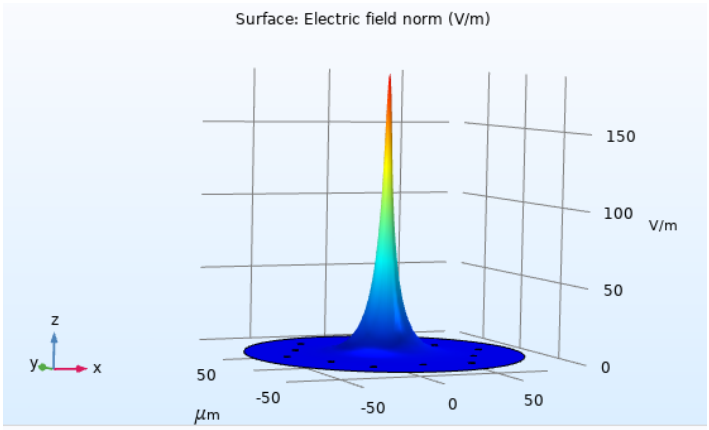
حيث شدة الحقل الكهربائي لكل نواة من النوى متساوية حيث تكون شدة الحقل أكبر في القمة، وتتناقص بالتدريج كما يبين الشكل (5-2).



الشكل (5-2) : شدة الحقل الكهربائي للتصميم النهائي.

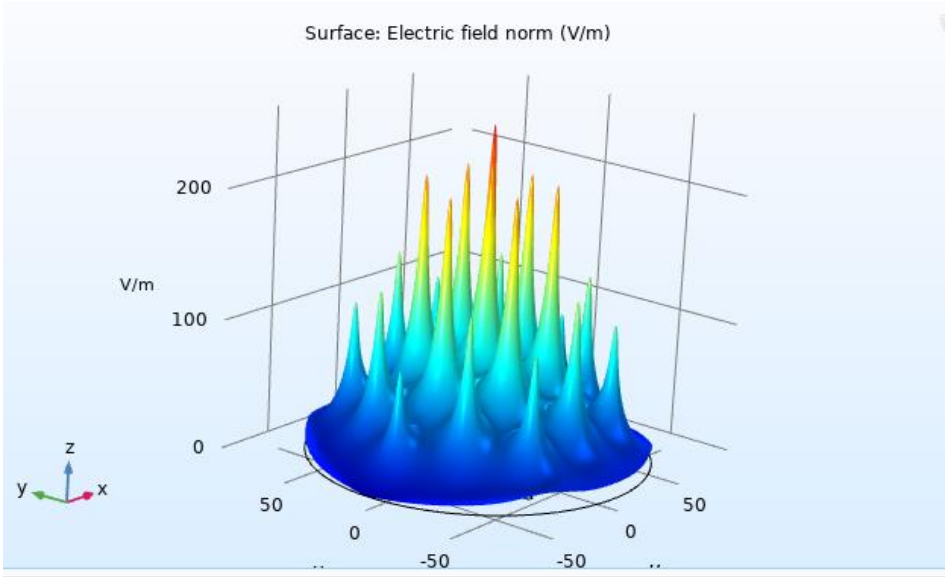
نلاحظ من الشكل السابق إن شدة الحقل لجميع النوى متساوية ممايؤدي إلى تداخل أقل مايمكن بين النوى

اما الشكل (5−3) فيبين شدة الحقل للنواة المركزية



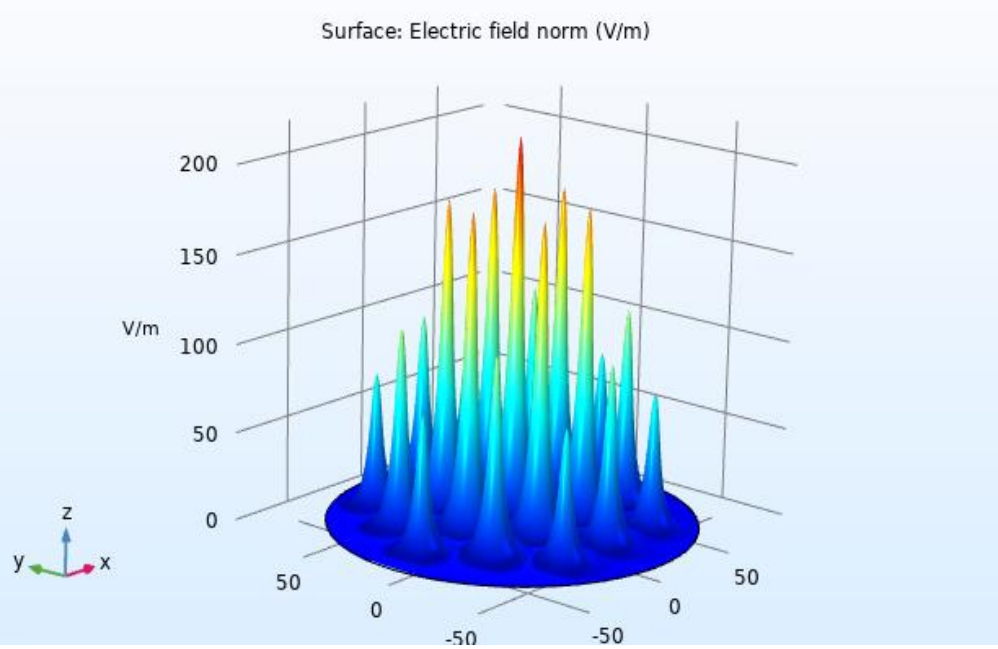
الشكل (5−3) شدة الحقل للنواة المركزية.

يبين الشكل**(5−4)** شدة الحقل للتصميم النهائي عند نصف قطر **a=1.7μm**



الشكل (5−4) شدة الحقل للتصميم النهائي عند a=1.7μm

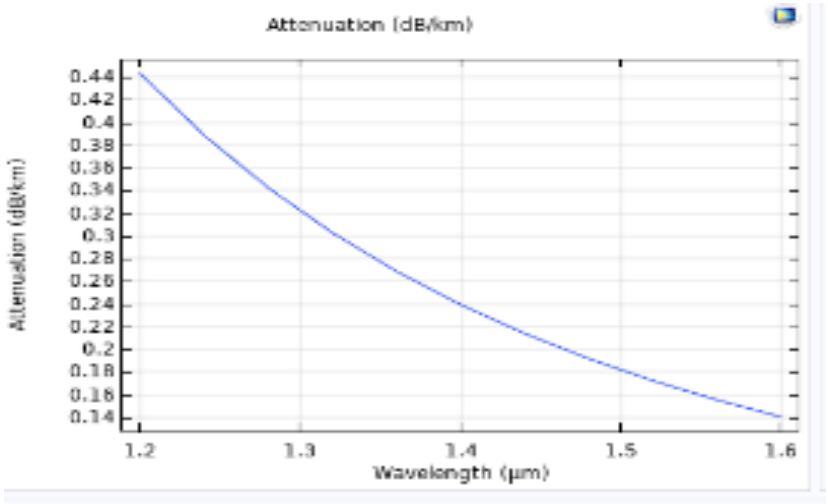
نلاحظ من الشكل السابق أن شدة الحقول للنوى غير متساوية ؛ ومن ثم التداخل سوف يزداد.



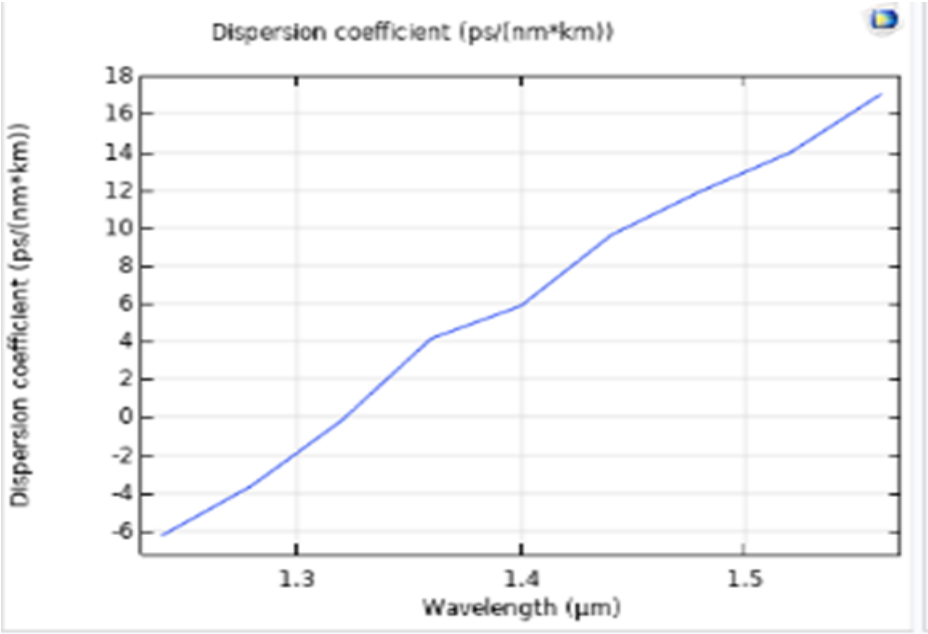
الشكل (5-5) شدة الحقل للتصميم النهائي عند a=2.73µm

نلحظ من الشكل السابق أن شدة الحقول للنوى غير متساوية؛ ومن ثم سوف يزداد.

عند محاكاة المرحلة الأخيرة من تصميم الليف؛ باستعمال comsol حصلنا على منحني التخامد المبين في الشكل (5-6)، ومنحني التشتت المبين في الشكل (5-7).

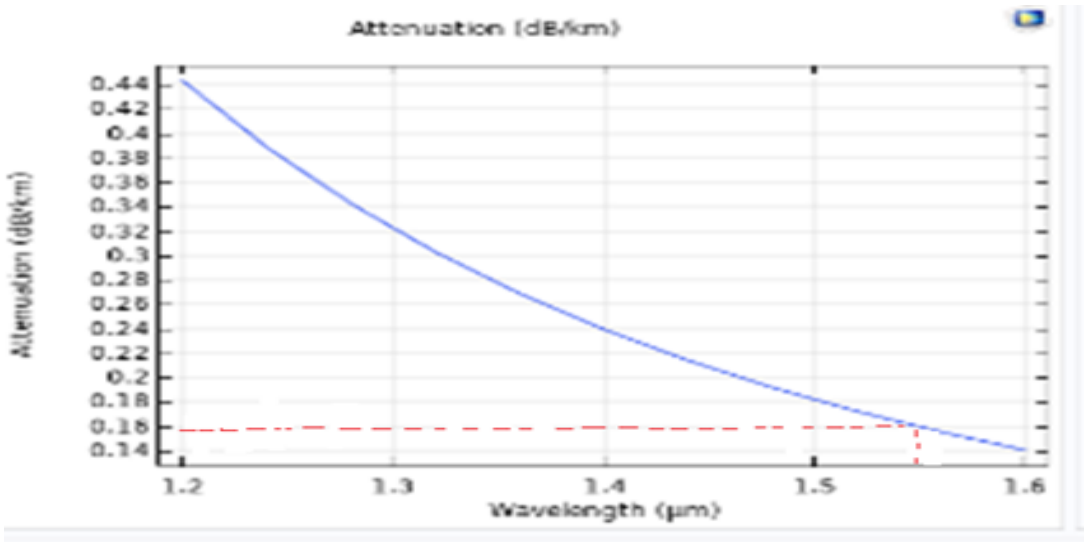


الشكل (5-6): منحني التخامد للتصميم النهائي (19نواة).

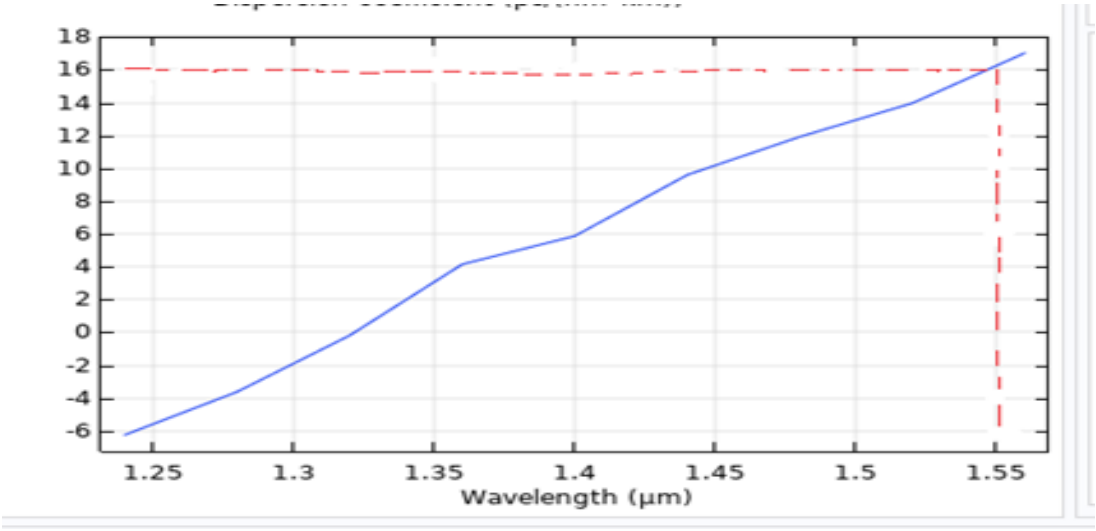


الشكل (5-7): يبين منحني التشتت للتصميم النهائي (19 نواة).

يبين الشكلان (5-8)و(5-9) قيمة تخامد مقبولة (0.16 dB/km) عند طول الموجة 1.55 µm، وكذلك قيمة تشتت مقبولة(16 PS/(nm.km)) عند طول الموجة 1.55 µm



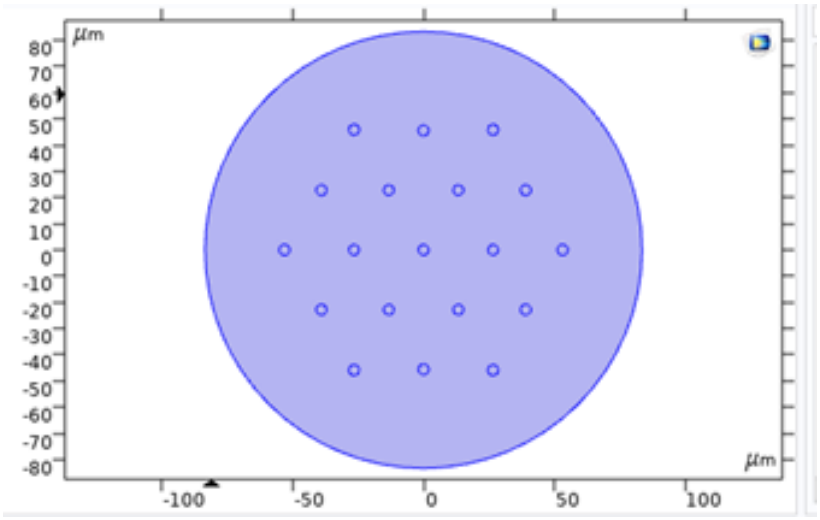
الشكل (5-8): يبين قيمة التخامد عند طول الموجة 1550 nm.



الشكل (5-9) يبين قيمة التشتت عند طول الموجة 1550 nm.

5-2 حساب التداخل:

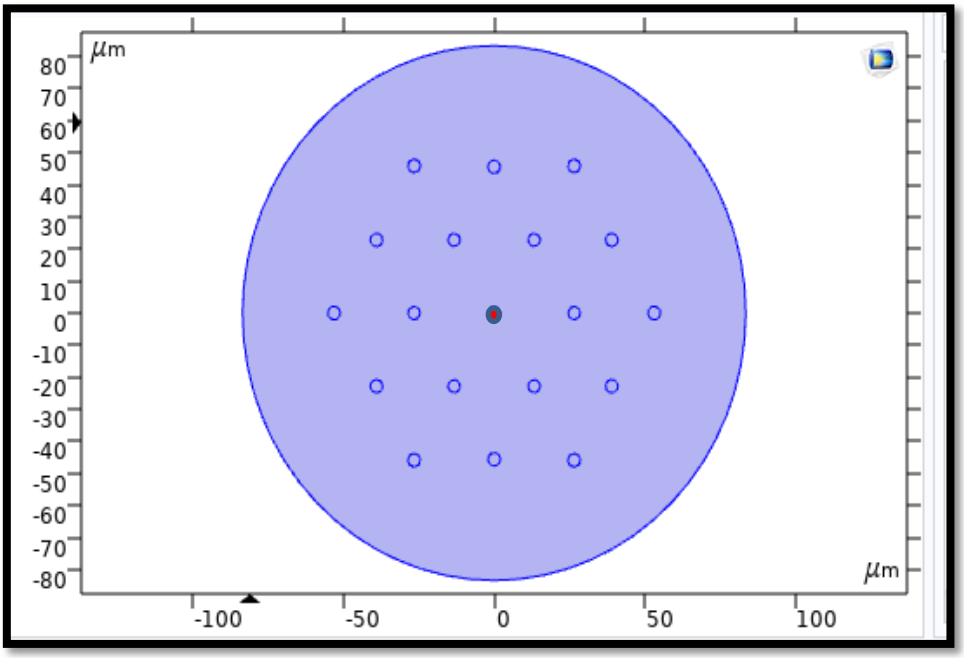
يحدث التداخل بين النوى المتجاورة حيث يمكن حساب التداخل لأحد النوى؛ باستعمال العلاقة (4-10) عن طريق حساب التداخل بين النواة المراد حساب التداخل عندها وإحدى النوى المجاورة؛ باستعمال العلاقة (4-7) ومن ثم نضربها بعدد النوى المجاورة بحيث تكون النوى المجاورة على المسافة نفسها من النواة المراد حساب التداخل لها.

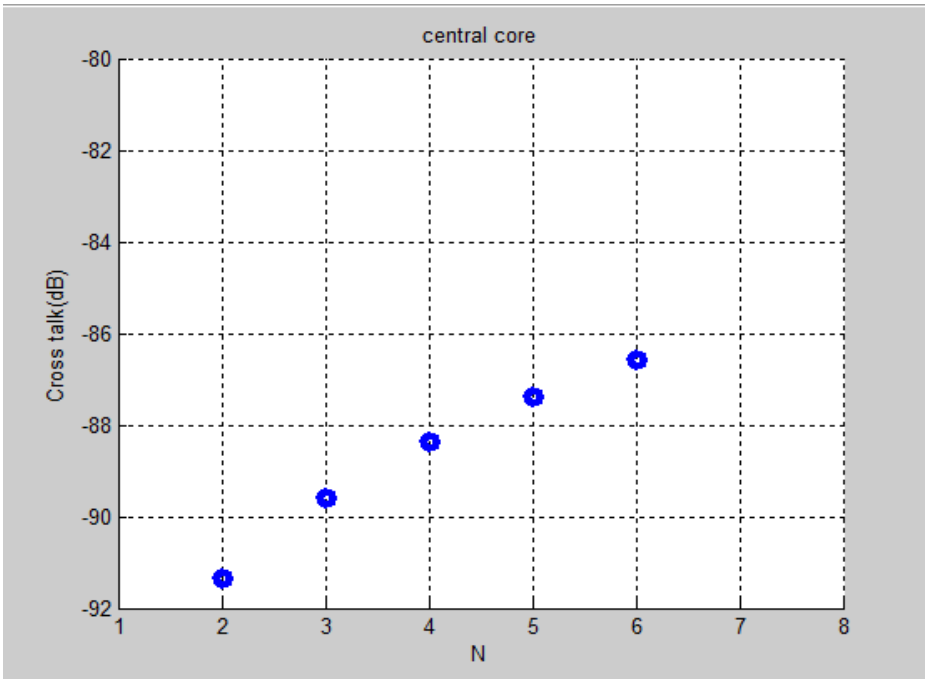


الشكل (5-10) : التصميم النهائي للنوى.

عند حساب التداخل للنواة المركزية نحسب التداخل بين النواة المركزية، مع إحدى النوى المجاورة ؛ باستعمال العلاقة (7) ومن ثم نضرب الناتج بعدد النوى المجاورة (6 نوى).

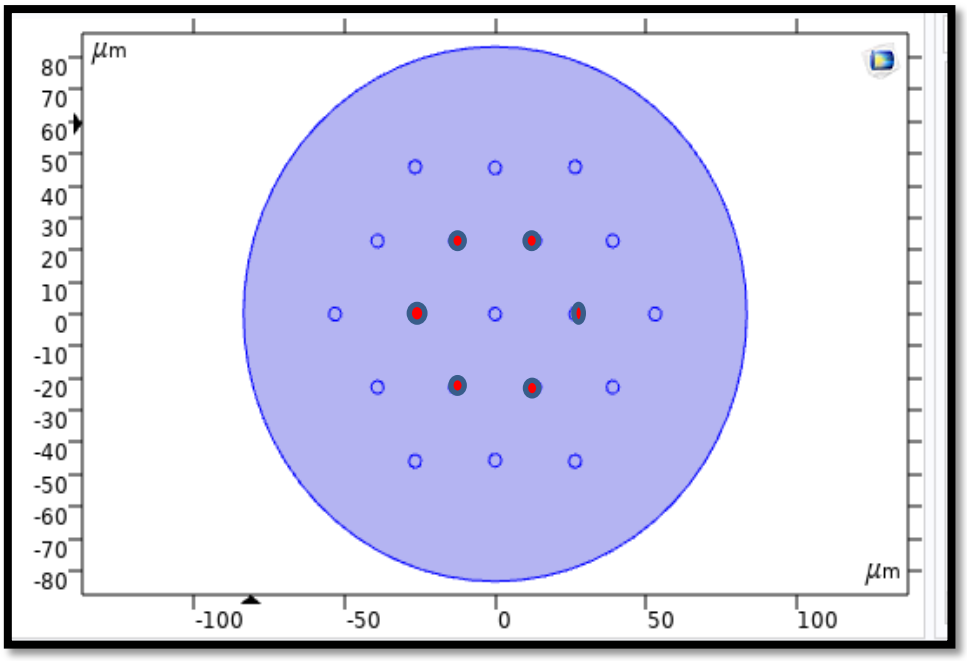
ويبين الشكل (5-11)منحني التداخل الحاصل للنواة المركزية:

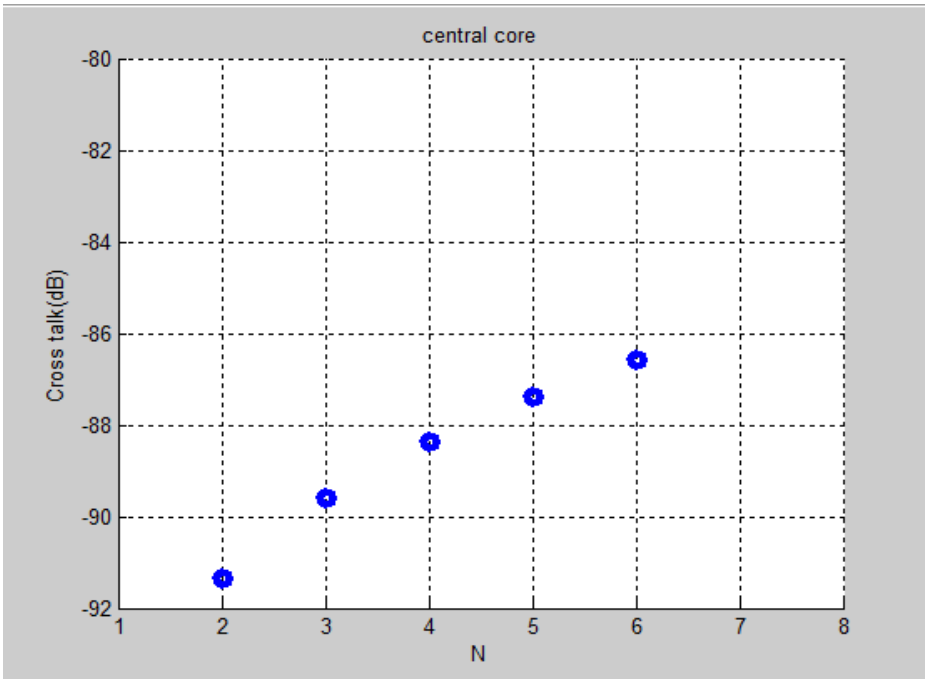




الشكل (5-11) : منحني التداخل الحاصل للنواة المركزية .

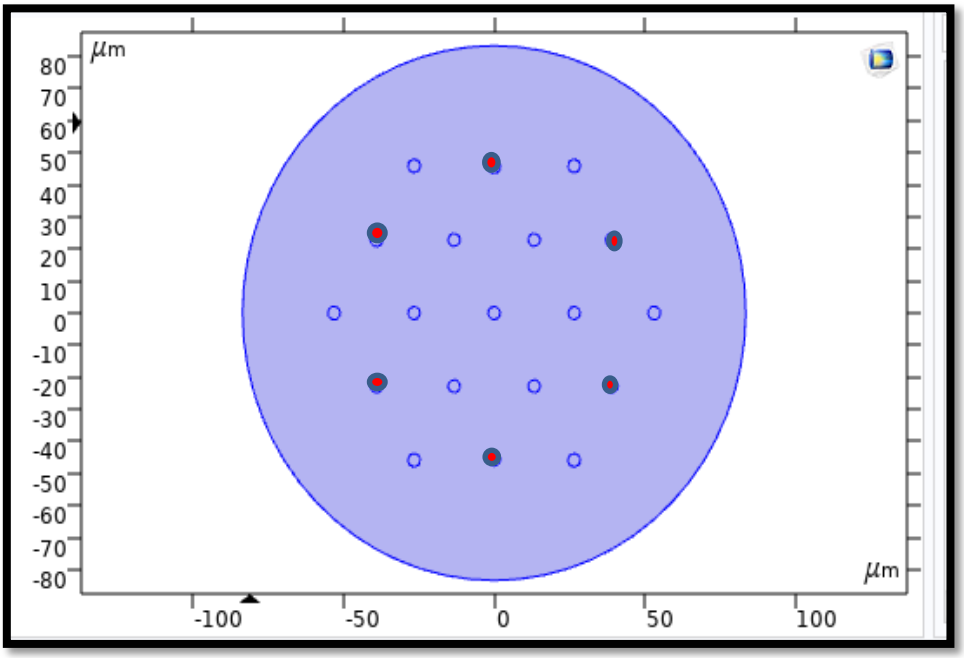
ويبين الشكل (5-12) منحني التداخل الحاصل لإحدى نوى الحلقة الداخلية .

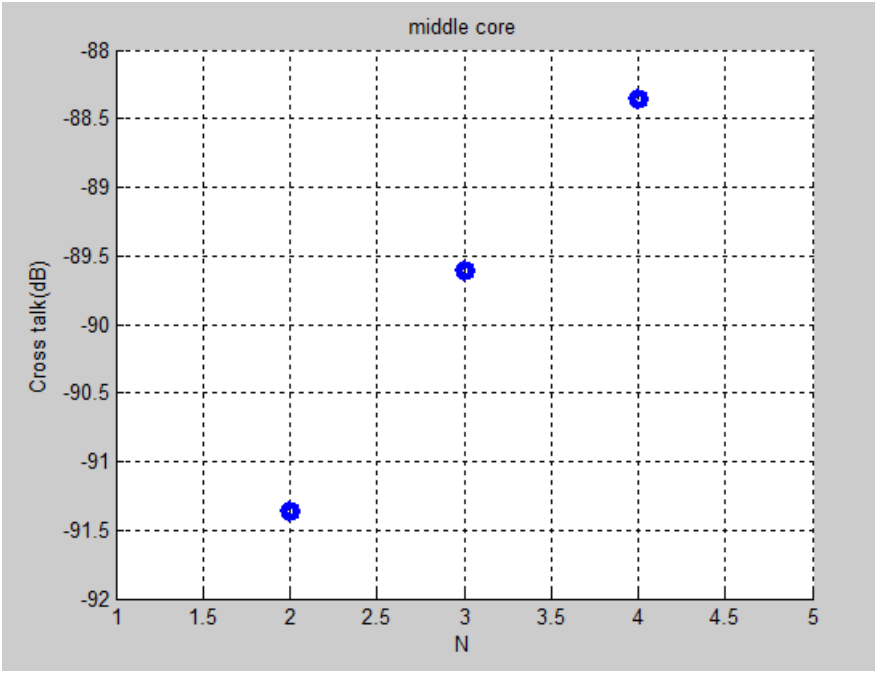




الشكل (5-12): منحني التداخل الحاصل لإحدى نوى الحلقة الداخلية.

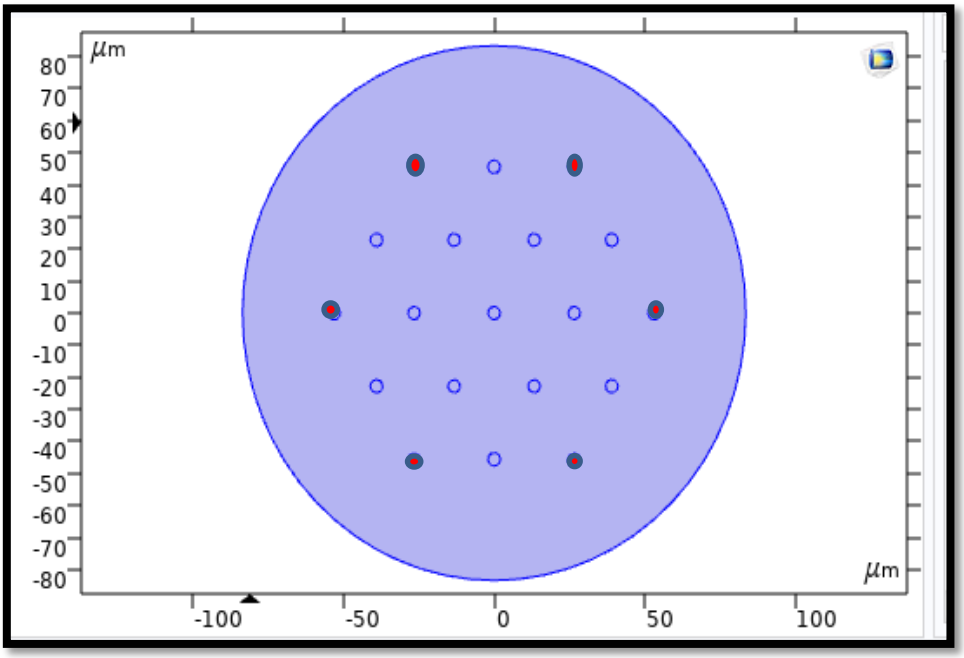
وعند حساب التداخل لإحدى نوى الحلقة الوسطى نحصل على المنحني المبين في الشكل (5-13):

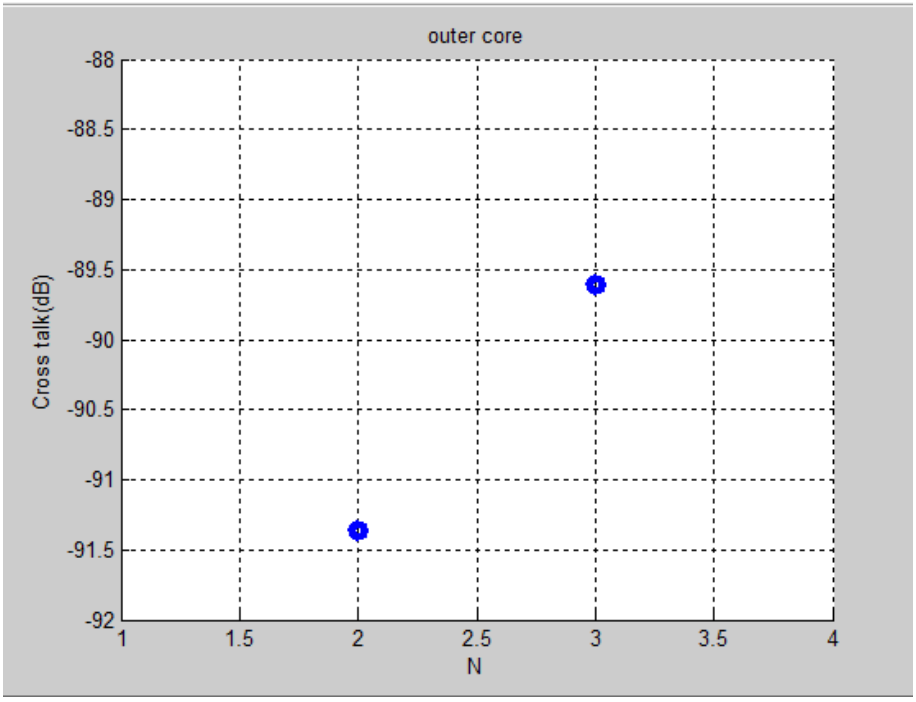




الشكل (5-13): التداخل لإحدى نوى الحلقة الوسطى.

وعند حساب التداخل لإحدى نوى الحلقة الخارجية نحصل على منحني التداخل كما يبين الشكل(5-14)

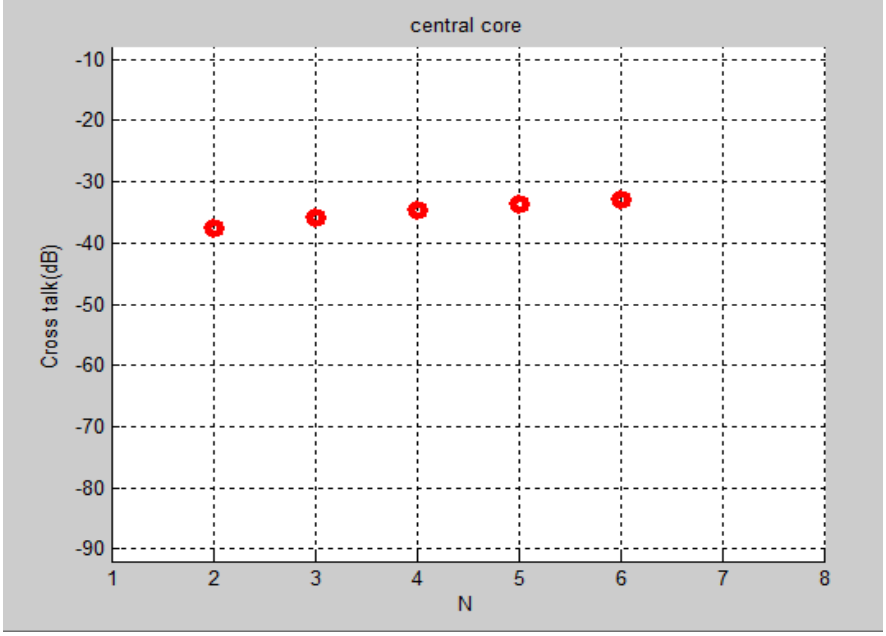




الشكل (5-14): التداخل لإحدى نوى الحلقة الخارجية.

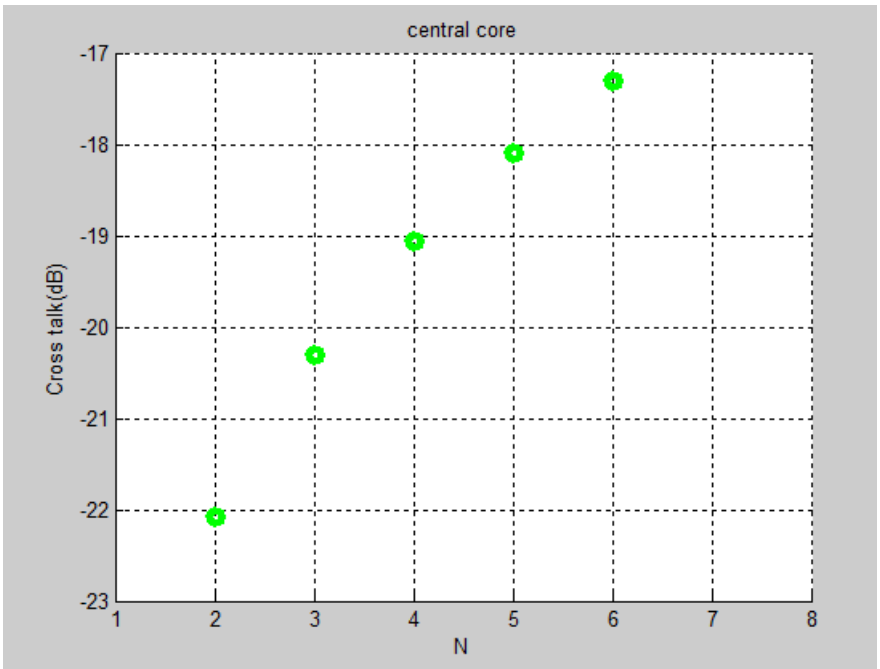
قمنا بدراسة التداخل عند تغيير نصف قطر النواة من أجل الحصول على أقل تداخل ممكن

عند تغيير قيمة نصف قطر النواة مثلاً 2.73 µm



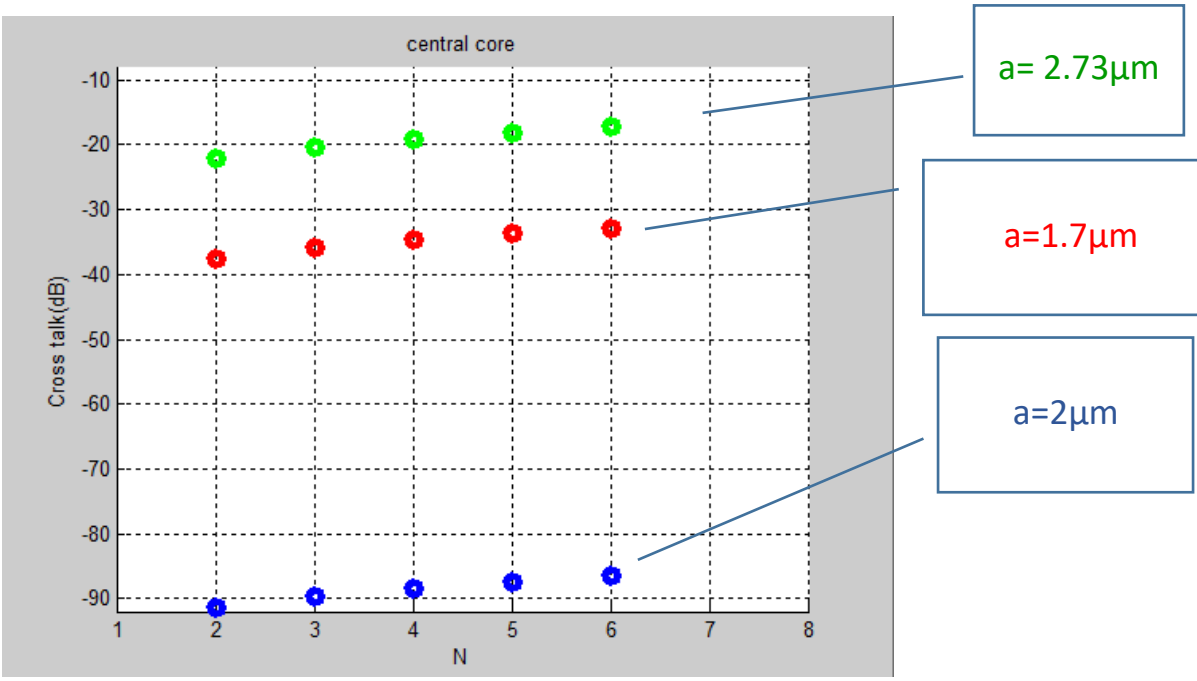
الشكل (5-15): تداخل النواة المركزية عند a = (2.73) µm

وعند أخذ قيمة أخرى لنصف القطر مثلاً 1.7µm .



الشكل (5-16): تداخل النواة المركزية عند a = (1.7) µm .

يبين الشكل مقارنة في حال استخدام أنصاف اقطار مختلفة تبين من خلالها زيادة التداخل (µm) 2.73, 1.7.

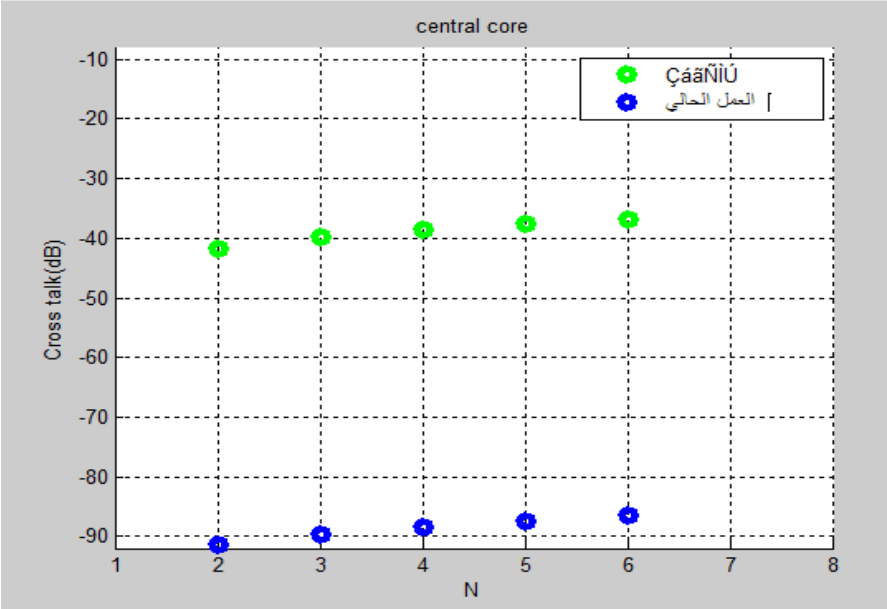


الشكل (5-17): تداخل النواة المركزية بالتدريج عند µm (2 , 1.7 , 2.73) = a

قمنا بمقارنة نتاءج العمل (المحاكاة)مع دراسة مرجعية سابقة(59) فيها المحددات التالية :

الجدول (5-2): مقارنة الدراسة الحالية مع دراسة سابقة:

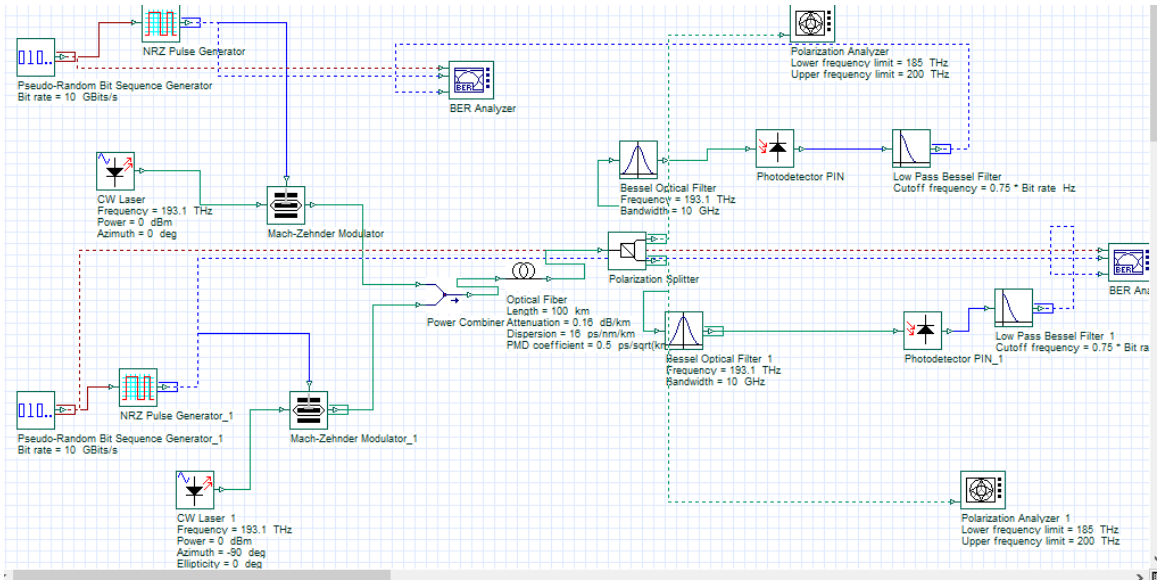
Ref	Ref(59)	Present Work
Core number N	19	19
Cladding diameter(µm)	200	166.6
Attenuation (dB/km)	0.227	0.16
Crosstalk (dB)	−42	−91
Core pitch(µm)	35	26.5

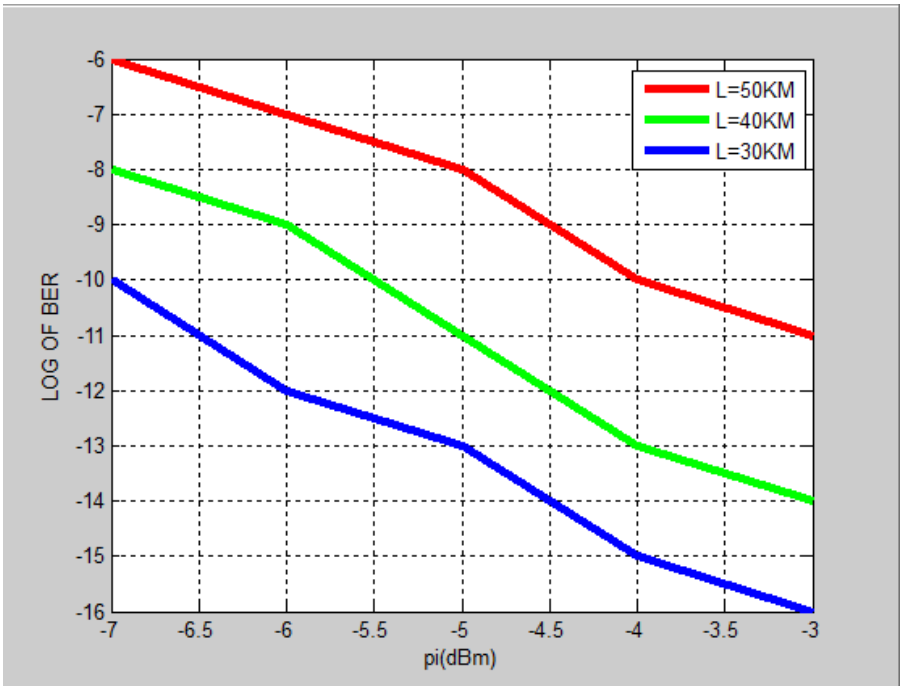


الشكل (5-18): مقارنة بين العمل الحالي والمرجع.

نلحظ بالمقارنة أنّ التداخل انخفض بمقدار 49dB وذلك بتغيير نصف القطر والمسافة بين النوى وقطر الغلاف

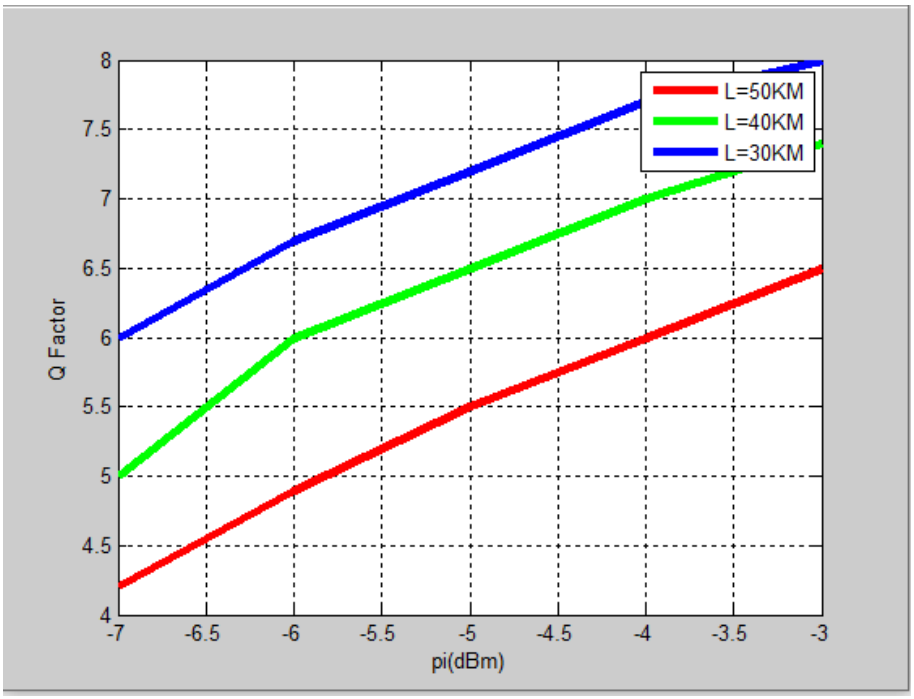
تطبيق على تقانة التجميع بتقسيم الاستقطاب؛ باستعمال برنامج ال optisystem [56]:





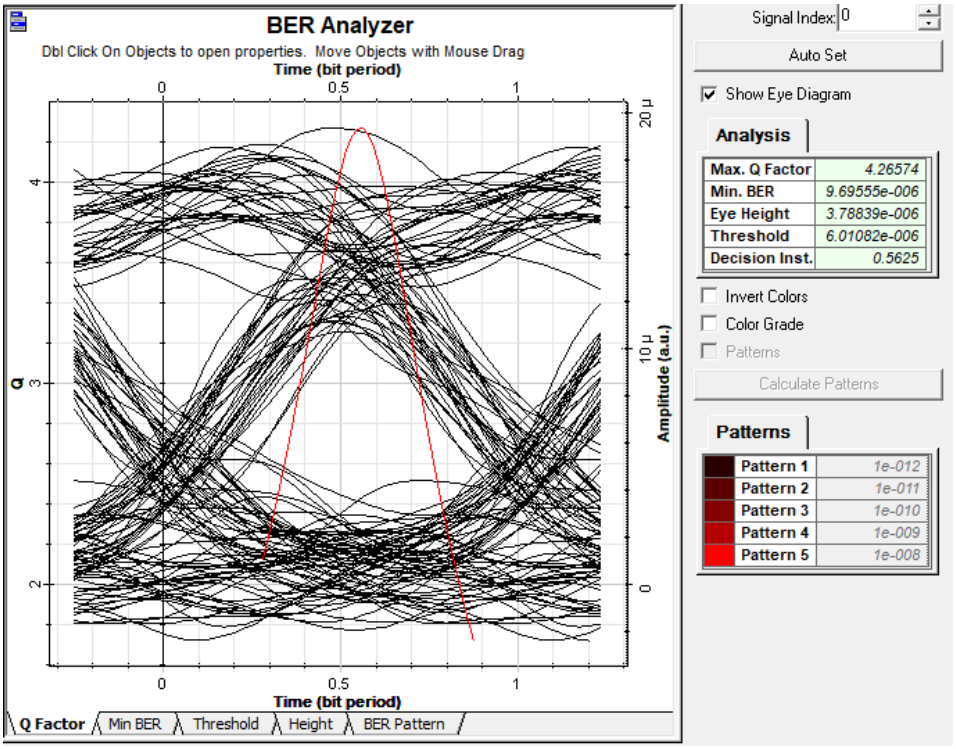
الشكل (5-19): معدل الخطأ لكل بت؛ تبعاً للاستطاعة المرسلة.

نلاحظ من الشكل السابق أن قيمة الخطأ BER تبلغ: 10^{-11}وهي قيمة مقبولة عند طول 50km واستطاعة إرسال 3dBm- .

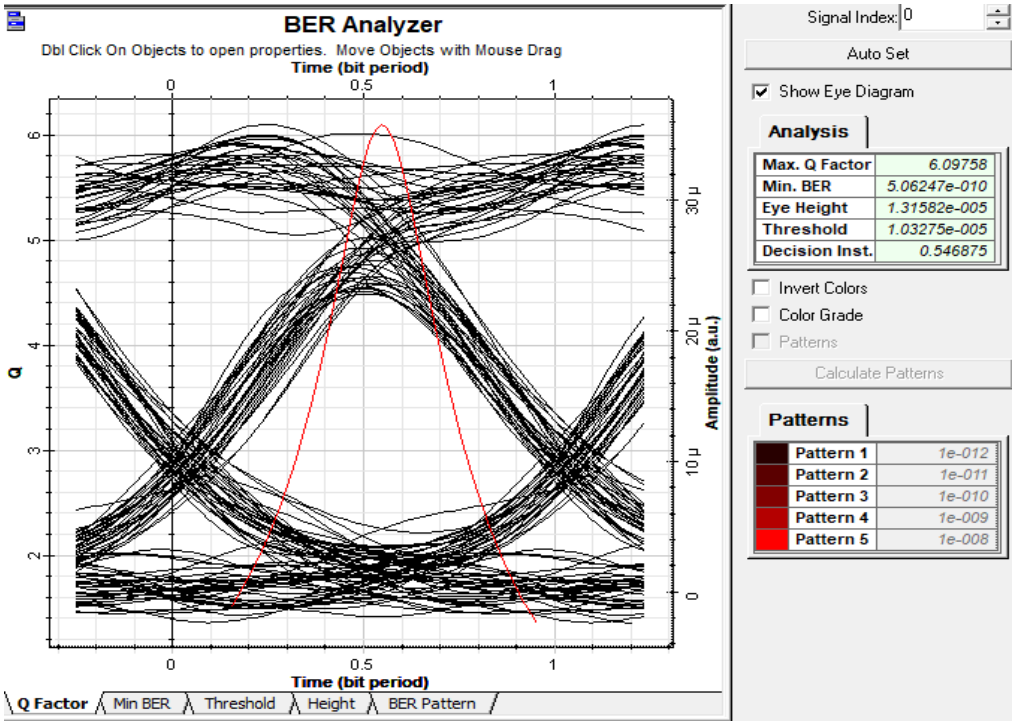


الشكل (5-20): منحني الجودة؛ تبعاً للاستطاعة المرسلة.

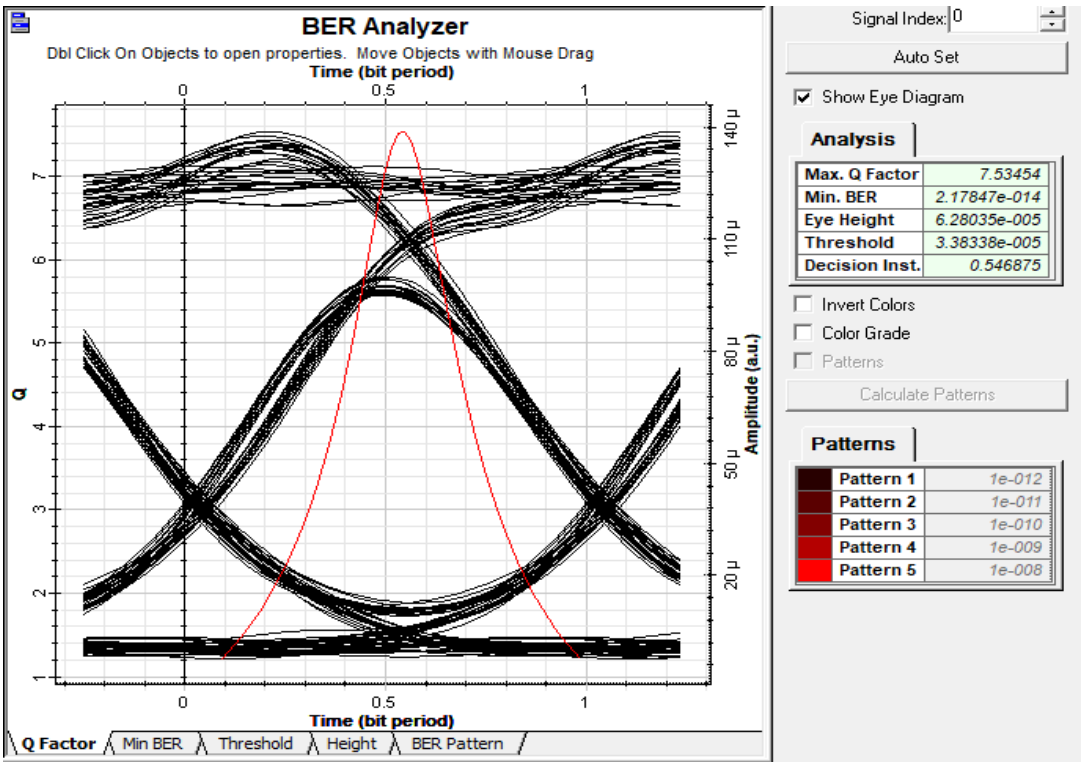
نلاحظ من الشكل السابق أن قيمة عامل الجودة مقبولة عندما L=50 km ؛ ومن ثم يمكن وضع مكرر كل 50km .



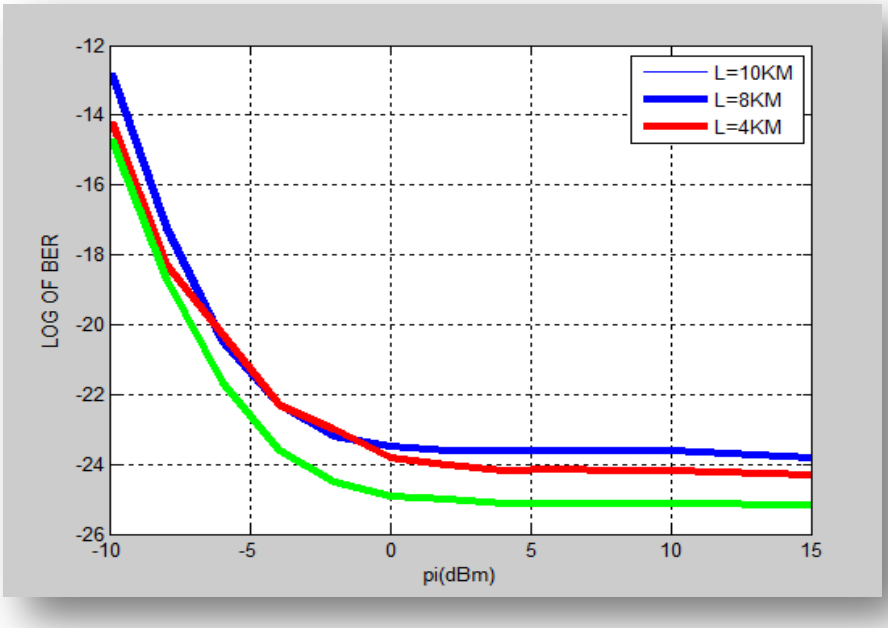
الشكل (5-21): مخطط العين عندما تكون الاستطاعة المرسلة 7dBm- .



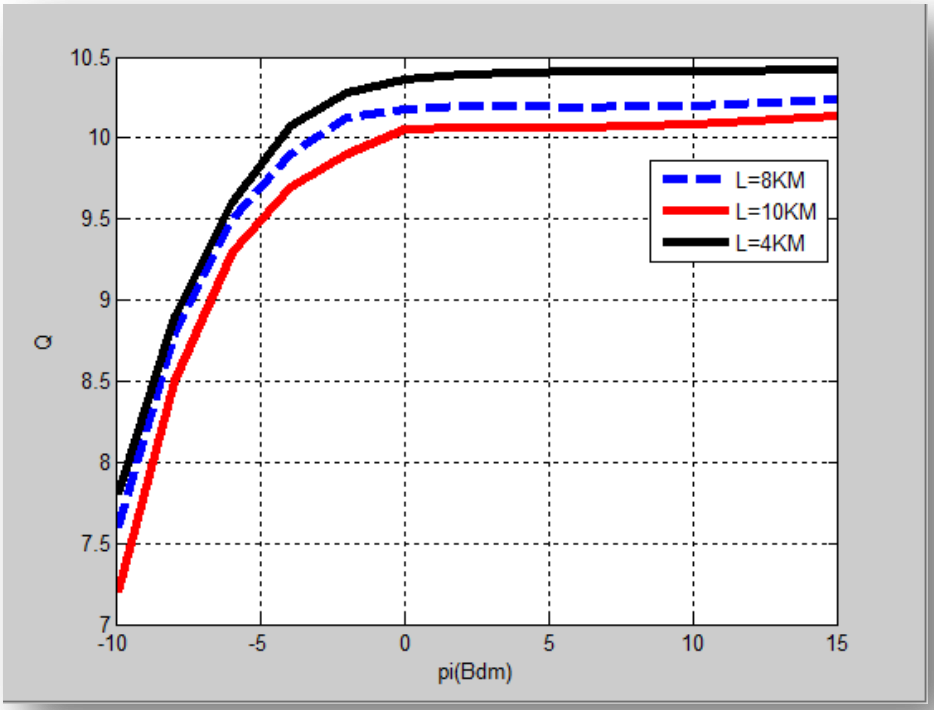
الشكل (5-22): مخطط العين عندما تكون الاستطاعة المرسلة 4 dBm- .



الشكل (5-23): مخطط العين عندما تكون الاستطاعة المرسلة 2 dBm .



الشكل (5-24): معدل الخطأ لكل بت؛ تبعاً للاستطاعة المرسلة.



الشكل (5-25): منحني الجودة؛ تبعاً للاستطاعة المرسلة.

الاستنتاجات والتوصيات :

الاستنتاجات :

1_ أظهرت النتائج وجود قيم أمثلية لنصف قطر النواة(a=2μm) والمسافة بين النوى(Λ= 26.5 μm) التي أعطت أقل قيمة للتداخل المتبادل بين النوى .

2 – يمكن عدّ الاستطاعة المرسلة 3- قيمة أمثلية حيث أعطت قيمة جيدة لعامل الجودة، ومعدل خطأ البت عند الطول 50km .

3- بلغت قيمة التداخل المتبادل بين النوى في دراستنا 91 dB- بينما في المرجع [59] بلغت 42dB- وبالتالي نلاحظ وجود تحسين في تقليل قيمة التداخل المتبادل بين النوى.

4- وجود علاقة طردية بين التداخل المتبادل بين النوى المحيطة بالنواة المدروسة وعدد النوى المحيطة بتلك النواة

5 – حُقّقَت قيمة تخامد مقبولة (0.16 dB/km) عند طول الموجة 1.55 µm وكذلك قيمة تشتت مقبولة 16 ((PS/(nm*km) عند طول الموجة 1.55 µm

6-عندما تكون الاستطاعة المرسلة أقل من4- ، فإن جودة الإشارة تقل بالنسبة للطول.

7- يُعدُّ الطول 50km هو الطول الأنسب حيث لا يمكن أخذ طول أكبر ؛لأن جودة الإشارة تقل

التوصيات :

1-يمكن تصميم الشبكة مع دراسة الوصلة بين المرسل والليف البصري.

2- يمكن الدراسة عند مسافات أطول.

3- يمكن دراسة mm-mcf ؛ بدلاً من sm-mcf

4- دراسة الوصلة بين منبع الإشارة والليف متعدد القلوب؛ لتحقيق عملية الاقتران الأمثلي.

5- دراسة تأثير انحناء الليف في التداخل بين النوى.

6- دراسة التداخل من أجل أشكال أخرى لليف متعدد النوى.

المراجع :

[1] بلال، إبراهيم؛ والجندي، عاطف.(2007). فيزياء الليزر وتطبيقاته. سورية: منشورات جامعة تشرين.

[2] جوزيف، باليز.(1992). الاتصالات بالألياف البصرية (ترجمة جورج صنيج). سورية: المنظمة العربية للتربية والثقافة والعلوم.

[3] نصور، ضيف الله؛ داود، نهلة؛ وقبس، عبد الباسط.(2006). الضوء الفيزيائي. سورية: منشورات جامعة تشرين.

[4] Malacara, Daniel; and Malakara, Zacarias. (2004). Handbook of Optical Design. 2nd ed. New York: Marcel Dekker, Inc.

[5] Csele, Mark. (2004). Fundamentals of Light Sources and Lasers. USA: John Wiley & Sons, Inc.

[6] Smith, Graham; King, Terry; and Wilkins, Dan. (2007). Optics and Photonics. 2nd ed. England: John Wiley & Sons Ltd.

[7] Griffiths, David. (1999). Introduction to Electrodynamics. 3rd ed. New Jersey:Prentice-Hall, Inc.

[8] الأعرج، بدر؛ وسليمان، حسن؛ وعباس، أسعد.[2004). الكهرطيسية. سورية: منشورات جامعة تشرين.

[9] عبد العزيز، محمد؛ والكنهل، مجيد.(2005). الكهرطيسية الهندسية. جامعة الملك سعود.

[10] Bass, Michael; Van, Eric; Williams, David; and Wolfe, William. (1995). Handbook of Optics. Vol 1. Fundamentals, Techniques , and Design. 2nd ed. USA: McGraw-Hill , Inc.

[11] Bass, Michael; Van, Eric; Williams, David; and Wolfe, William. (1995). Handbook of Optics. Vol 2. Devices, Measurements, and Properties. 2nd ed. USA: McGraw-Hill , Inc.

[12] Murphy, Douglas. (2001). Fundamentals of Light Microscopy and Electronic Imaging. USA: Wiley-Liss, Inc.

[13] Ghatak, Ajoy; and Thyagarajan, k.(2000). Optical waveguides and Fibers. Fundamentals of Photonics.(pp 249-292).India: University of Connecticut.

[14] Ghatak, Ajoy; and Thyagarajan, k.(1997). Introduction to Fiber Optics. New Delhi.

[15] Binh, L; Chin, k; and Sharma, D. (2003). Design of Dispersion Flattened and Compensating Fibers for Dispersion-managed Optical Communication Systems (Technical Paper). IEEE Journal of Lightwave Technology.

[16] Malitson, I. (1965). Interspecimen Comparison of the Refractive Index of Fused Silica, OSA.55 (10), 1205-1209.

[17] Senior, John.(2009). Optical Fiber Communications: Principles and Practice. 3rd ed. England: Pearson Education Limited.

[18] Peatross, Justin; and Ware, Michael. (2008). Physics of Light and Optics.Brigham Young University.

[19] Saurabh; and Kumar,V.(2015). Power Communication using Optical-Fiber. IPASJ International Journal of Electrical Engineering (IIJEE). 3 (12), 11-15.

[20] Essiambre, R. J; Kramer, G; Winzer, P. J; Foschini, G. J; and Goebel, B. (2010). Capacity Limits of Optical Fiber Networks (Invited Paper). Journal of Lightwave Technology . 28 (4), 662-710.

[21] Agrawal, Govind. (2002). Fiber-Optic Communication Systems. 3rd ed. New York: John Wiley & Sons,Inc.

[22] Laferriere, J; Lietaert, G; Taws, R; and Wolszczak, S. (2007). Reference Guide to Fiber Optic Testing. Vol 1. USA: JDSU.

[23] Crisp, John; Elliott, Barry. (2005). Introduction to Fiber Optics. 3rd ed. John Crisp and Barry Elliott. www.newnespress.com.

[24] Keiser, Gerd.(2000). Optical Fiber Communications. 3rd ed. USA:Mc Graw-Hill Companies, Inc.

[25] Thyagarajan, k; and Ghatak, Ajoy. (2007). Fiber Optic Essentials. New Jersey: John Wiley & Sons,Inc.

[26] Kumar, Shiva; and Jamal Deen, M.(2014). Fiber Optic Communications: Fundamentals and Applications. Canada: John Wiley & Sons, Ltd.

[27] Shaw.k, J.(2004). Mathematical Principles of Optical Fibers Communications. USA: Society for Industrial and Applied Mathematics.

[28] Spiegel, Murray; Lipschutz, Seymour; and Liu, John. (2009).
Mathematical Handbook of Formulas and Tables. 3rd ed. USA: McGraw-Hill Companies, Inc

[29] Collings, Brandon; Heismann, Fred; and Lietaert, Gregory. (2010). Reference Guide to Fiber Optic Testing: Advanced Fiber Optic Testing. Vol 2. USA: JDSU.

[30] Udayakumar, R; Khanaa, V; and Saravanan, T .(2013). Chromatic Dispersion Compensation in Optical Fiber Communication System and its Simulation. Indian Journal of Science and Technology. 6 (6), 4762 – 4766.

[31] K. M. PATEL, A New Concept in Intermodal Dispersion Compensation for Multimode Fiber," Spatially Resolved Equalization School of Electrical and Computer Engineering Georgia Institute of Technology, Ph.D Thesis 2004 .

[32] A. FLATMAN, "10 Gigabit Ethernet over Legacy Multimode Fiber," [Online] Available www.baileyteswaine.co.uk/solutions/whitepapers/4.pdf .

[33] A. OLIVIERO, "Optical Fiber for Data Center and Storage Applications," [Online] Available: www.bicsi.org/Content/Files/PDF/link/Oliviero.pdf. 2006

[34] S. SCHÖLLMANN; S. SONEFF; W.ROSENKRANZ. "10.7 Gb/s Over 300 m GI-MMF Using a 2 x 2 MIMO System Based on Mode Group Diversity Multiplexing". Optical Society of America, 2007, 3.

[35] K. CHAUHAN; M. SAXENA, Subcarrier Multiplexing in Optical Networks. International Journal of Electronics and Communication Engineering., Volume 4, Number 2, (2011), pp. 171175 .

[36] ACHYUT, K.D.; NILOY, K.D.; MASAHIKO, F. WDM Technologies: Optical Networks,1st .ed ,Academic press Inc, USA,2004.

[37] P. BOOBALAN; M. Mathimanirangan; V. Kumar; M. Barakathulla, Hybrid Ptical Switching In Optical Code Division Multiplexing Networks. IJRET: International Journal of Research in Engineering and Technology, Volume: 03 Issue: 02 , Feb-2014, 5

[38]F. BAKLOUTI; R.ATTIA. "Effect of the MMF Curvature in the System Capacity of an Optical MIMO Channel Using MGDM Technique". IJCSI International Journal of Computer Science Issues, Vol. 10, Issue 2, No 3, March 2013, 4 .

[39] T. KOONEN, H. V. D. BOOM, A. NG'OMA, L. BAKKER, I. T. MONROY,G.-D. KHOE, "Novel Signal Multiplexing Methods for Integration of Services in in-Building Broadband Multimode Fibre Networks". COBRA Institute, Eindhoven Univ. of Technology, The Netherlands, 2004, 7 .

[40] M. DE BOER, C.P. TSEKREKOS, A. MARTINEZ, H. KURNIAWAN, J.W.M. BERGMANS, A.M.J. KOONEN, H.P.A. VAN DEN BOOM, F.M.J. WILLEMS, "A First Demonstrator for a Mode Group Diversity Multiplexing Communication System". Dept. of Electrical Engineering, Eindhoven University of Technology, Eindhoven, The Netherlands, 2006, 5 .

[41] C.P. TSEKREKOS, A. MARTINEZ, F.M. HUIJSKENS, A.M.J. KOONEN, "Mode Group Diversity Multiplexing Transceiver Design for Graded-Index Multimode Fibres". COBRA Research Institute, Eindhoven University of Technology, Eindhoven, The Netherlands, 2005, 2 .

[42] C. P. TSEKREKOS, A. MARTINEZ, F. M. HUIJSKENS, A. M. J. KOONEN, "Design Considerations for a Transparent Mode Group Diversity Multiplexing Link". IEEE PHOTONICS TECHNOLOGY LETTERS, VOL. 18, NO. 22, NOVEMBER 15, 2006, 3.

[43] PINTO, J. Study and optimization of core allocation in multi - core optical fibers .2016, 58.

[44] MARTINE, L. Investigation on Crosstalk in Multi - core Optical Fibers . Barcelona, 2015, 46. [45] ABRAMOWITZ, M and STEGUN, I.1965, Handbook of Mathematical Functions . New York,40. [46] YUAN,H; FURDEK,M; MUHAMMAD,A; SALJOGHEI,A; WOSINSKA,L and ZERVAS,G. Space - Division Multiplexing in Data Center Networks: On Multi - Core Fiber Solutions and Crosstalk - Suppressed Resource Allocation . America, 2018, 17.

[47] SAITOH, K and MATSUO , SH. Multicore Fiber Technology . Japan, 2016, 12.

[48] SASAKI, Y; TAKENAGA, K; GUAN, G; MATSUO, SH; SAITOH, K; and KOSHIBA, M. Few - mode multicore fibers for long - haul transmission line. Japan,2016,9 .

[49] AWAJI, Y. Review of Space - Division Multiplexing Technologies in Optical Communications . Japan, 2018, 17.

[50] JOHNSON, M. Optical Fiber, Cables and Systems . ITU, Switzerland, 2010, 299 .

[51] DUTTA, A. Mode Analysis of Different Step Index Optical Fibers at 1064nm

for High-power Fiber Laser and Amplifier. International Journal of Electronics and Communication Technology (IJECT), India, Vol. 6, No. 3, 2015, 74-77
[52] SAURABH; and KUMAR,V. Power Communication using Optical-Fiber. IPASJ International Journal of Electrical Engineering (IIJEE), India, Vol. 3, No. 12, 2015 .
[53] DUBEY, P; and SHUKLA,V. Dispersion in Optical Fiber Communication. International Journal of Science & Research (IJSR), India, Vol. 3, No. 10, 2014, 236239.
[54] Samael Sarmiento Hernández," Passive Optical Networks: Introduction",
[Internet]. 2018. Available from: https://www.researchgate.net/publication/327261446
[55] Keiser, Gerd (2006). FTTX concepts and applications. John Wiley & Sons, Inc.
[56] SAKKOUR,A." Development the performance Of Optical Network Units (ONU) by Polarization Division Multiplexing technique " vol .38,N.2 ,2016.
[57] Hayashi T, Taru T, Shimakawa O, Sasaki T, Sasaoka E. Ultralow-crosstalk multi-core fiber feasible to ultra-long-haul transmission. In Optical Fiber Communication Conference and Exposition and National Fiber Optic Engineers Conference (OFC/NFOEC), PDPC2, March 2011.
[58] Zhu B, Taunay TF, Fishteny M, Liu X, Chandrasekhar S, Yan MF, Fini JM, Monberg EM, Dimarcello FV. 112-Tb/s space-division multiplexed DWDM transmission with 14-b/s/Hz aggregate spectral efficiency over a 76.8-km seven-core fiber. Opt Exp 2011;19:16665–71.
[59] Sakaguchi J, Puttnam BJ, Klaus W, Awaji Y, Wada N, Kanno A, Kawanishi T, Imamura K, Unaba H, Mukasa K, Sugizaki R, Kobayashi T, Watanabe M. 19-core fiber transmission of 19x100x172-Gb/s SDM-WDM-PDM-QPSK signal at 305 Tb/s. In Optical Fiber Communication Conference and Exposition and National Fiber Optic Engineers Conference (OFC/NFOEC), PDP5C.1, March 2012.
[60] Ahmed Samir1,2, Jakup Ratkoceri1,3, and Boštjan Batagelj1,ITEC,2018.
[61] Saeed Sharif Azadeh. “Multicore fibers with 10 and 16 single-mode cores for the visible spectrum”2022.
[62]Santosh Kumar and all . Journal of Lightwave Technology,2022
[63]TangM.’’MulticoreFibers’’,2019.

Damascus University

Ministry of Higher Education and Scientific Research

Faculty of Mechanical and Electrical Engineering

Electronics and Communication Engineering

Department



Improving the Performance of Passive Optical Communication Networks using Multi-Core Fibers

A Dissertation Submitted in Partial Fulfillment of the requirements for the Degree of Master in Advanced Communication Engineering

Prepared by

Eng. Orwa Yousef Salman

Supervised by

Dr. Eng. Afif Sakkour **Dr.Eng Hafsah Al Hamwi**

Academic Year
2021-2022