فصلنامه پژوهش در علوم، مهندسی و فناوری
دوره ۱، شماره ۱، زمستان ۱۳۹۴
صفحات ۷-۲۲
ISSN: 2476-5082
www.uctjournals.com

تلفات فیبر نوری و راه های جبران و بهینه سازی

شهاب رحیمی

دانشکده علوم پایه، دانشگاه پیام نور، تهران، ایران

چکیده

در این پروژه، شیوه ی عملکرد، عوامل تضعیف و برخی از راههای جبران آنها در فیبرهای نوری مورد بررسی و مطالعه قرار گرفته است. در ابتدا با بیان مزایا و کاربردهای فیبرنوری با این پدیده جهت انتقال اطلاعات آشنا می شویم. در ادامه با مطالعه در حوزه فیبر نوری، چگونگی انتقال نور و قابلیتهای آن در فیبر نوری را مورد بررسی قرار داده و سپس با بیان انواع مختلف فیبر نوری کاهش تلفات را مورد مطالعه قرار می دهیم و همچنین شبکه انتقال به وسیله ی تارهای نوری که پس از ارزشیابی چگونگی تلفات به وسیله ی فیبر ها، در پایان با نتیجه گیری عوامل موءثر در کاهش تلفات و بهینه سازی آن و کارایی مطلوب انتقال در روند این فرایند مورد ارزیابی قرار می گیرد.

واژه‌های کلیدی: فیبر نوری۱، انعکاس داخلی کلی۲، تابش۳، انعکاس۴، انکسار۵، تضعیف۶، پراکندگی۷ ، خمش۸، اتصال۹

1 Optical fiber
2 total internal reflection
3 ncidence
4 reflection
5 refrection
6 Loss
7 Seattering Losses
8 Bend Loss
9 Joint & Splices Loss

۱- مقدمه

در عصر شکوفایی فرایند فن آوری اطلاعات و شکوفایی اندیشه ها در استفاده بهینه از کامپیوترها و ماهواره‌ها، بشر می‌تواند در آن واحد تصویر، صدا و دیگر اطلاعات مورد نیاز خود را در حداقل زمان دریافت یا ارسال کند. همزمان با ورود به قرن ۲۱ توجه دست‌اندرکاران صنعت مخابرات و مراکز تحقیقاتی به فناوری روز دنیا یعنی فیبر نوری بیشتر شد، به اعتقاد یکی از کارشناسان ارتباطات با استفاده از فیبر نوری زیرساخت‌های محلی و شهری ارتباطات قادر خواهد بود با سرعت‌های بیشتر و کیفیت برتر به یکدیگر و به زیرساخت‌های منطقه‌ای و جهانی اطلاعات بپیوندند. با بکارگیری آخرین فناوری‌های انتقال نوری، زیرساخت لازم برای تمام کاربردهای الکترونیکی از قبیل تجارت الکترونیکی، دولت الکترونیکی و بانکداری الکترونیکی فراهم می شود و ارائه خدمات ارتباطی ارزان، پرسرعت، ایمن و با کیفیت عالی به همه اقشار امکان‌پذیر می‌گردد.در اینجا، سیگنال‌ها بر خلاف تکنولوژی کابل‌مسی، به کمک موجبرهایی موسوم به تارهای‌نوری، به شکل نوری تک فرکانسی ارسال می‌شوند.فیبر نوری از پالس‌های نور برای انتقال داده‌ها از طریق تارهای سیلیکون(شیشه) بهره می‌گیرد که قطر هر یک از تارها نظیر قطر یک تار موی انسان است بطوریکه یک کابل فیبر نوری که کمتر از یک اینچ قطر دارد می‌تواند صدها هزار مکالمهٔ صوتی را حمل کند . فیبرهای نوری تجاری ظرفیت ۲/۵ تا ۱۰ گیگابایت در ثانیه را فراهم می‌سازند. در دو دهه‌ی اخیر، مخابرات نوری از طریق کابل‌های تارنوری، رقیبی عمده برای سیستم‌های گذشته و موجود مخابراتی شده‌است. با توانایی محیط انتقال تار نوری در ارسال اطلاعات با ظرفیت بالا و قدرت فرستنده‌ی کم، این روند در سال‌های آتی بیشتر مورد توجه قرار خواهد گرفت، به نحوی که با گذشت زمان وپیشرفت تکنولوژی ، سیستم مخابرات تارنوری ، جایگاه والاتری در شبکه‌ی مخابراتی آتی خواهد داشت. لذا در این مقاله عواملی که باعث تضعیف مدهای نوری شده را بررسی و روشهای جبران آنها را جهت بهینه سازی و بیشترین پالاس دریافتی را توسط گیرنده های پالس نوری مورد بررسی قرار می دهیم.[1]

۲. فیبر نوری

۲-۱) تعریف فیبر نوری:

فیبرهای نوری رشته های بلند و نازکی از شیشه بسیار خالص اند که ضخامتی در حدود قطر موی انسان دارند. آنها در بسته هایی به نام کابلهای نوری کنار هم قرار داده می شوند و برای انتقال سیگنالهای نوری در فواصل دور مورد استفاده قرار می گیرند. اگر با دقت به یک رشته فیبر نوری نگاه کنید، می بینید که از نور در بخش مرکزی فیبر که ساخته شده از شیشه و موسوم به تارهای نوری است، به وسیله ی پدیده انعکاس داخلی کلی سیر می کند.

۲-۲) ساختمان فیبر نوری و چگونگی انتقال:

به طور کلی فیبر نوری نوعی موجبر دی الکتریک از جنس شیشه، پلاستیک یا کوارتز است که سیگنالهای نوری بر اساس بازتابش داخلی کلی می توانند در آن عبور کنند[۳و۴] از لحاظ ساختمان فیبر نوری شبیه یک استوانه بسیار باریک است که از سه قسمت تشکیل شده است: هسته، غلاف و پوشش ساخته شده است.

الف- هسته یا مغزی[10] :

در مرکز تار نوری قرار دارد و برای هدایت نور به کار می رود. هدایت موج فقط در داخل هسته امکان پذیر است ، زیرا ضریب شکست هسته n_1 از ضریب شکست پوشش n_2 بزرگ تر است. مد ها با انعکاس کلی مداوم در حد فاصل هسته و پوشش ، درون هسته باقی می مانند، شعاع مغزی بسته به نوع فیبر از ۵μm تا ۱۰۰μm است. [۵]

10 Cor

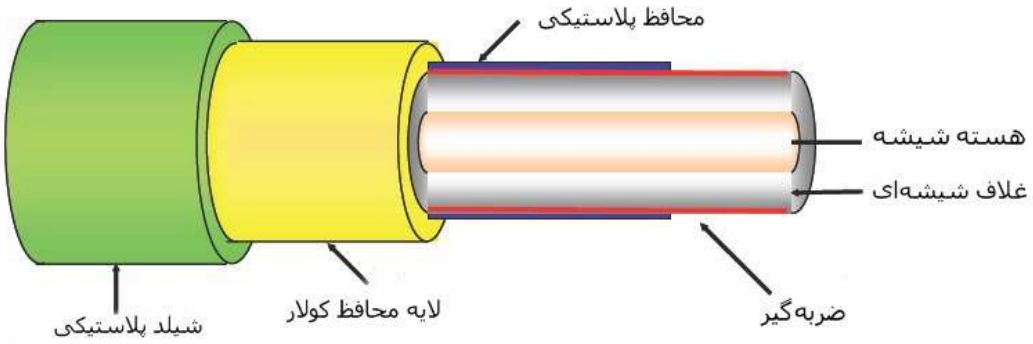
ب- غلاف یا روکش [11] :

در حقیقت لایه ای است که ضمن تولید ، سطح پوشش را مستقیما در بر می گیرد. برای تزویج نور به داخل یا خارج تار و یا اتصال تار ها به یکدیگر، بایستی بتوان روکش را از آن جدا کرد، شعاع استاندارد آن برابر $۱۲۵\mu m$ است. [۵]

ج- پوشش محافظ [12] :

خارجی ترین قسمت فیبر را پوشش داده و می تواند در چنین لایه قرار بگیرد، قطر استاندارد آن برابر $۲۵۰\mu m$ است. این قسمت، فیبر را در برابر عوامل خارجی نظیر: رطوبت، فشار، ضربه و دیگر عوامل محیطی محافظت می کند و جنس آن از پلاستیک و یا پلیمر است

روکش ضمن این که می تواند از چندین لایه ی پلاستیکی تشکیل شود ، می بایست تمام طول تار را بدون هیچ گونه لختی یا تغییراتی در ضخامت آن ، به شکل یکنواخت بپوشاند. [۵]



شکل ۲-۱ ساختمان فیبر نوری

۲-۳) اپتیک هندسی و پارامترهای فیبر نوری:

زمانی که یک شعاع نور را به سطح جدایی دو محیط می تابانیم (تابش)، قسمتی از آن به داخل محیط اول بازمی گردد (انعکاس) و بقیه ی این شعاع نورانی شکسته شده و به محیط دوم وارد می شود (انکسار)، میزان انکسار نور در سطح جدایی دو محیط بستگی به اختلاف سرعت نور در دو محیط دارد.

۲-۳-۱ قانون اسنل و بازتابش کلی

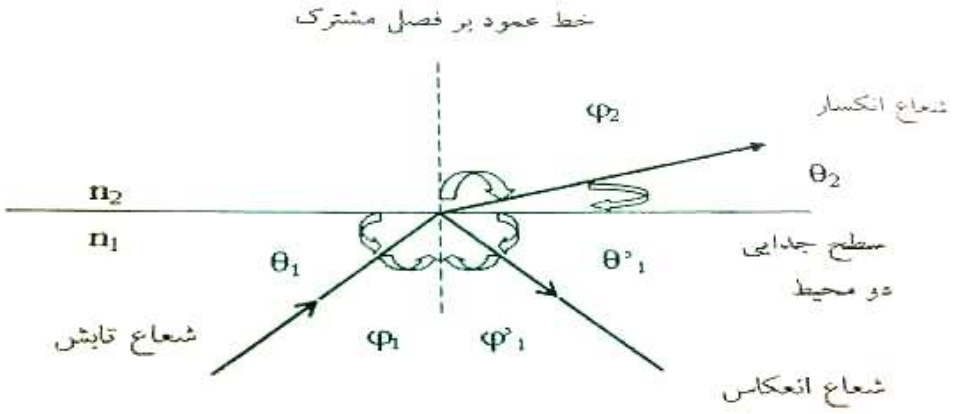
رابطه ضریب شکست، زاویه ی شکست و تابش که به عنوان قوانین اسنل شناخته می شوند، به صورت زیر بیان می گردد:

۱- برای دو محیط مشخص، نسبت سینوس زاویه ی تابش به سینوس زاویه ی شکست مقدار ثابتی است.

$$n_1 \sin\varphi_1 = n_2 \sin\varphi_2 \rightarrow \frac{\sin\varphi_1}{\sin\varphi_2} = \frac{n_2}{n_1} \qquad (۱-۲)$$

[11] Cladding

[12] Buffer



شکل۲-۲ پدیده های تابش، انعکاس و انکسار.

۲- اگر زاویه ی تابش از زاویه ی بحرانی($\varphi_2 = \frac{\pi}{2}$) بیشتر شود $\varphi_1 \rangle \varphi_2$ انعکاس کلی رخ می دهد و شعاع تابش به محیط اول باز می گردد واز سطح مشترک دو محیط نوری به خارج ساطع نمی شود که این وضعیت ایده آلی است که در فیبر های نوری جهت انتقال نور بدان نیازمندیم. در عمل مقداری انرژی نور از سطح شیشه نفوذ می کند و این همان چیزی است که به وسیله ی تئوری امواج الکترومغناطیس قابل توضیح است. [۲]

۲-۴ پارامترهای مهم در تار نوری

۲-۴-۱ طول موج قطع فیبر نوری[۱۲]:

به کمترین طول موجی می گویند که انتشار با هر طول موج بیشتر از آن به صورت تک مد عمل می کند. در زمان انتشار در فیبر تک مد اگر طول موج چشمه نور از طول موج قطع کمتر باشد مدهای فرعی در کنار مد اصلی انتشار یافته که در این صورت فیبر تک مد به صورت فیبر چند مد عمل می کند. طول موج قطع به دیگر پارمترهای ساخت بستگی دارد و برای هر فیبر در حین ساخت مشخص می شود.

طول موج قطع برای فیبر های تک مد برابر رابطه(۳-۱) است.

$$l_c = \frac{2pan_1}{u_c}\sqrt{2\mathrm{D}} \qquad (۲-۲)$$

که در آن a شعاع هسته، D اختلاف شکست نسبی بین هسته و پوسته، n_1 ضریب شکست هسته و u_c بسامد بهنجار قطع است.[۲]

۲-۴-۲قطر میدان مد:

به پهنای توزیع شده مد گفته می شود که مقدار آن در سطح $\left(1/e^2\right)$ از حداکثر شدت تعیین می شود. دامنه شدت نور روی محور مغزی برای شعاع $r = 0$ دارای بیشترین مقدار است. با افزایش قطر میدان مد طول موج بیشتر می شود. در فیبرهای تک مد مقدار قطر میدان مد تقریبا برابر قطر هسته است و در فیبرهای چند مد بسته به نوع فیبر متفاوت است. [۲]

---

۱۲ Cutoff wavelength

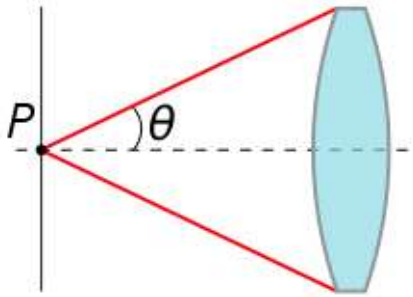
۲-۴-۳ گشودگی عددی[۱۴]:

یکی از پارامترهای مهم در تارنوری دهانه عددی تار است این گشودگی عددی تعیین کننده بیشترین زاویه ای ست که نور تحت آن می تواند به درون فیبر هدایت شود. در واقع گشودگی عددی نشان دهنده توان جمع آوری نور یک فیبر است.[۲و۶]

در بیشتر زمینه‌های نورشناسی دهانه عددی یک سیستم‌نوری مانند یک عدسی‌شیء بوسیله

$$NA = n\sin\theta \qquad (۲-۳)$$

تعریف می‌شود که n ضریب‌شکست محیطی است که لنز در آن کار می‌کند (مانند هوا با ضریب شکست ۱ و آب با ضریب‌شکست ۱,۳۳ و روغن با ضریب‌شکست ۱,۵۶) و q نصف زاویه ماکزیمم مخروط نور است که می‌تواند خروجی یا ورودی لنز باشد.



شکل۲-۳ نمایش زاویه پذیرش تار نوری

به طورکلی این زاویه پرتو مرزی حقیقی در سیستم است که دهانه زاویه‌ای لنزها تقریباً دو برابر این مقدار است. دهانه عددی معمولاً نسبت به شیء مخصوص یا نقطه‌ی تصویر اندازه‌گیری می‌شود. در یک تار مولتی مد، فقط نوری انتشار خواهد یافت که ورودی تار، یک مخروط معین باشد که به عنوان مخروط پذیرش۱۵ تار نامیده می‌شود و نصف زاویه این مخروط زاویه پذیرش $q_{\max}$ نام دارد. در یک تار مولتی مد زاویه پذیرش فقط بوسیله زاویه شکست تعیین می‌شود:

$$n\sin\theta_{\max} = \sqrt{n_1^2 - n_2^2} \qquad (۲-۴)$$

که n_1 ضریب‌شکست هسته تار و n_2 ضریب‌شکست غلاف تار است.

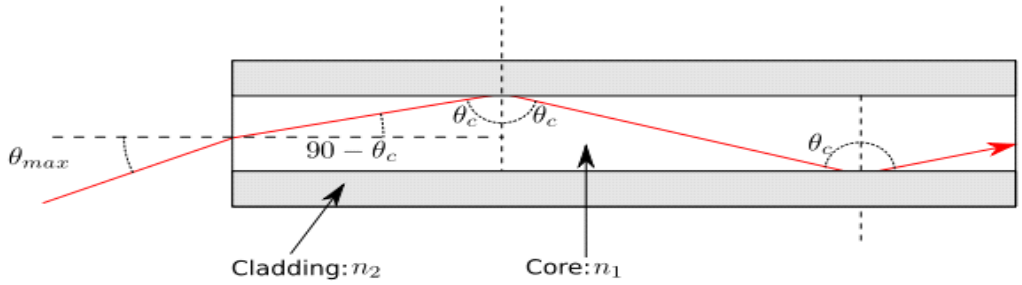
وقتی پرتو نور از محیطی با ضریب‌شکست n به مخروط با ضریب‌شکست n_1 در زاویه‌پذیرش بیشینه بتابد قانون اسنل در فصل مشترک هسته- محیط با این رابطه داده می‌شود:

که در این رابطه θ_c زاویه بحرانی برای انعکاس درونی کل است.

$$\theta_c = \sin^{-1}\frac{n_2}{n_1} \qquad (۲-۵)$$

---

۱۳ Numerical Aperture
۱۴ Acceptance cone



شکل۲-۴ نمایش زاویه بحرانی و بیشترین زاویه پذیرش در تار نوری

با برخی جایگزینی ها داریم:

$$NA=\sqrt{n_1^2-n_2^2} \qquad (۲-۶)$$

۳- تضعیف(تلفات)[۱۶] در فیبر نوری و روش جبران :

تضعیف تحت تاثیر عوامل مختلفی اتفاق می افتد که به دو عامل اصلی، الف)عوامل ذاتی که ناشی از خود فیبر است. ب)عوامل غیر ذاتی که ناشی از اتصالگرها، هم بافتگرها و یاجفتگرها می باشد.[۱]

محاسبه تضعیف بر حسب دسی بل db رابطه زیر حاصل می شود.

$$\text{تضعیف}(db)=-10\log\left(\frac{p_2}{p_1}\right) \qquad (۳-۱)$$

p_2 توان خروجی و p_1 توان ورودیبست و مسلما $p_2\langle p_1$ است.

$$\text{افت کل=افت}(db)_1+\text{افت}(db)_2+\ldots\ldots \qquad (۳-۲)$$

۳-۱ عوامل ایجاد تلفات در فیبر نوری:

از آنجا که لایه آینه پوش اطراف هسته هیچ نوری را جذب نمی کند، موج نور می تواند فواصل طولانی را طی کند. به هر حال، برخی از سیگنالهای نوری در حین حرکت در طول فیبر، ضعیف می شوند که علت عمده آن وجود برخی ناخالصی ها داخل شیشه است. میزان ضعیف شدن سیگنال به درجه خلوص شیشه به کار رفته در داخل فیبر و نیز طول موج نوری که درون فیبر سیر می کند بستگی دارد،

افت یا تلفات سیگنال و پهنای باند دو عامل مهم در ارزیابی سیستم های مخابراتی می باشند . این دو عامل که به جنس فیبر و روش شاخص آن وابسته است. تابع طول موج نور نیز می باشد و عبارتند از:

[۱۶] Loss

تلفات جذبی.

تلفات پراکندگی ، به دلیل نا همگون ضریب شکست هسته فیبر

- **تلفات پراکندگی، به علت ناهمواریهای مرز میان هسته و غلاف فیبر(تلفات مرزی)**
- **تلفات ناشی از خمش فیبر نوری.**
- **تلفات ناشی از اتصال فیبر ها به یکدیگر (تلفات در محل اتصالات).**
- **تلفات در ورودی و خروجی فیبر.**

۳-۱-۱ تلفات جذبی:

جذب: جذب تحت تاثیر این عوامل اتفاق می افتد:

خواص ذاتی ماده و خود شیشه

ناخالصی ها مانند یون OH

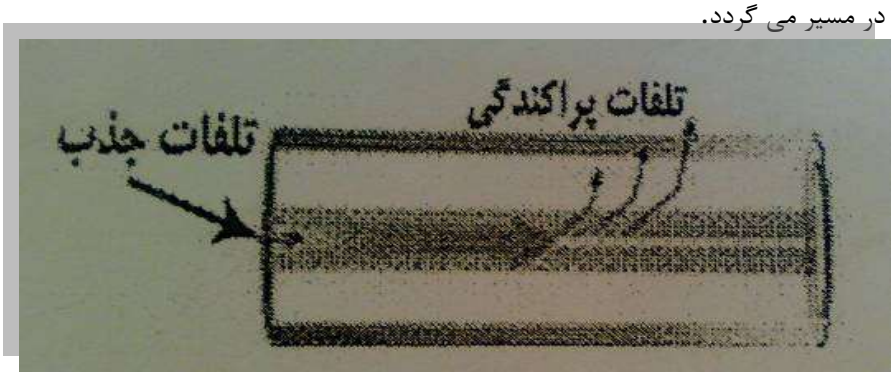
نقصان های اتمی در شیشه.

۳-۱-۱-۱ پدیده جذب ذاتی۱۷ (داخلی):

منشأ این پدیده ها، ذات خود شیشه به عنوان محیط انتشار می باشد که باعث ایجاد تضعیف می گردد، عوامل ذاتی خود به دو دسته جذب و پراکندگی تقسیم می شوند.

۳-۱-۱-۲ پدیده جذب عارضی۱۸ (خارجی):

در ساخت فیبر ، به روش ذوب مستقیم (روش $MCVD$) مقدار خلوص به ۱۰۰٪ نمی رسد و اتمهای فلزی (یونهای فلزات) هر چند به مقدار کم، باقی می مانند، و همین اتمها، باعث بوجود آمدن پدیده جذب می شوند، تقریبا کارخانه های سازنده این عامل را مهار کرد ه اند و در ساخت فیبر به روش رسوب بخار، این پدیده را، یک تا دو برابر کاهش داد ه اند. از عوامل دیگر این نوع جذب یون های OH غیرفلزی می باشد که ناشی از تبخیر آب که در مراحل پیوند و مفصل بندی باعث به وجود آ مدن افت های شدیدی در مسیر می گردد.



شکل ۳-۱ پدیده ی تلفات جذبی در فیبر

[17] Interestic Absorption

[18] Extrinsic Absorption

۳-۱-۲ تلفات پراکندگی

تلفات پراکندگی علاوه بر مواد سازنده فیبر، به غیر یکنواختی فیبر بستگی دارد. این تلفات عمدتا از عواملی نظیر تغییرات و نوسانات چگالی جزئی در حجم و محتوا و ترکیب مواد و نا همگونی های ساختمانی فیبر نوری که در موقع ساخت آن به وجود می آید، ناشی می‌شود و در فیبرها به دو صورت خطی و غیر خطی روی می دهد.[۷]

۳-۱-۲-۱ پراکندگی خطی:

که خود به دو نوع پراکندگی رایلی و مای تقسیم می شود؛ که معروفترین نوع، پراکندگی رایلی (Rayleigh) می باشد که در آن هر چه طول موج کوتاه تر باشد پراکندگی بیشتر است.

افت حاصل از پراکندگی بر حسب دسی بل بر کیلومتر با معادله زیر بیان می شود:

$$\text{پراکندگی} = A\lambda^{-4} \qquad (۳-۳)$$

$A\lambda^{-4}=$ ثابت و متناسب با ماده است.

الف- پراکندگی ریلی:

این فرایند در شیشه همانند فرایندی ست که نور خورشید را در اتمسفر می پراند و نور سفید آسمان را به صورت آبی که یکی از طول موج های نور سفید است را نشان می دهد زیرا نور آبی به طور موثری پراکنده می شود و هنگامی که ارتفاع خورشید کم است مسیر نور از لایه های پر ذره طولانی تر می شود و نور قرمز بهتر عبور می کند. بعلت سرد کردن شیشه مذاب بی نظمی ای در چگالی و جامد آن بوجود می آید که این خود عامل تغییرات ضریب شکست در شیشه است. در طول موجهای حدود $1\mu m$ این نوع افت غالب است و در طول موجهای $1.3\mu m$ افت تا کمتر از $0.3\frac{db}{km}$ نیز می رسد.[۷]

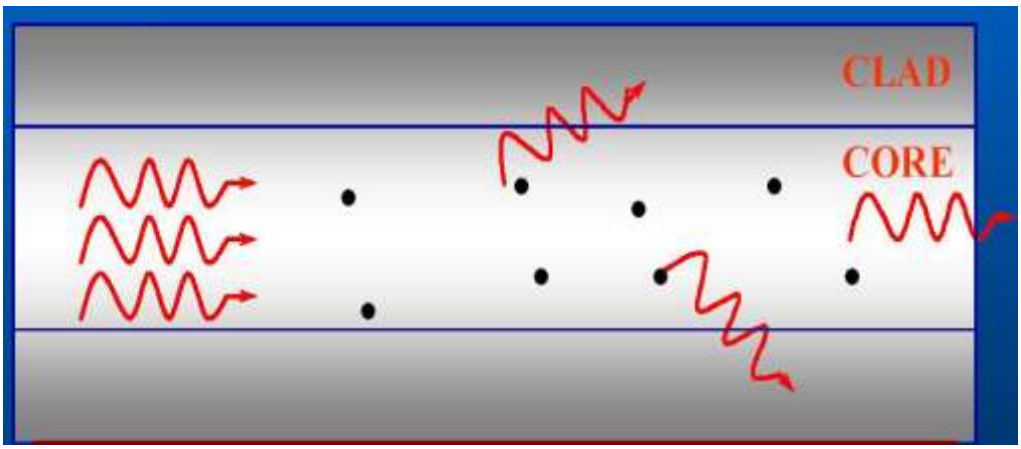
در یک شیشه تک مولفه ای ضریب پراکندگی ریلی از رابطه زیر به دست می آید:

$$\lambda_R = \frac{8\pi^3}{3\lambda^4} n^8 \rho^2 \beta_c K t_f \qquad (۴-۳)$$

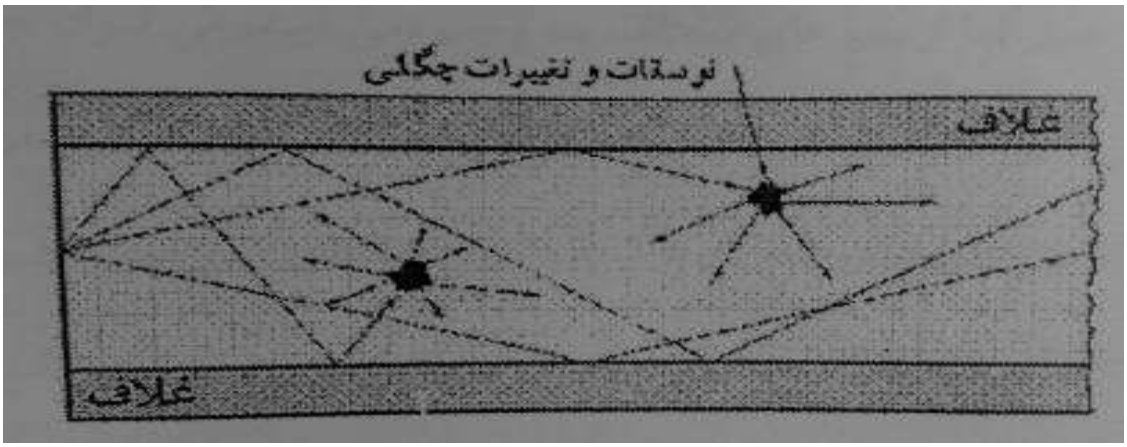
λ_R ضریب پراکندگی ریلی، λ طول موج اپتیکی، n ضریب شکست محیط ρ ضریب فتوالاستیسیته متوسط β_c تراکم پذیری تک دما بر دمای تعادلی ساخت t_f، و k ثابت بولتزمن است دمای تعادل دمایی است که شیشه در آن دما به حالت توازن گرمایی می رسدو با گرمای داده شده به سیستم رابطه دارند از طرفی ضریب پراکندگی ریلی با عامل افت انتقالی در فیبر، به صورت زیر رابطه دارد.

$$\delta = \exp(-\gamma RL) \qquad (۵-۳)$$

L طول فیبر است. از معادله تک مولفه ای ضریب پراکندگی ریلی مشخص است که مولفه اصلی پراکندگی ریلی در بزرگترین طول موج ممکن بسیار کاهش می یابد.کمترین تضعیف گزارش داده شده برای اکسید سیلیسیم در طول موج $0.63\mu m$، $3.9\frac{db}{km}$ است. با این وجود مقادیر $4.8\frac{db}{km}$ و $5.2\frac{db}{km}$ نیز گزارش شده است. شکل (۴-۲)



شکل ۴-۲-الف پدیده ی تلفات جذبی در فیبر



شکل ۳-۲-ب تلفات پراکندگی و نوسانات در چگالی فیبر

نوسانات در چگالی، خود معلول نوسانات حرارتی مروط به اتمهای تشکیل دهنده شیشه است و زمانی رخ می دهد که فیبر در حال سرد شدن در مرحله ساخت باشد. عوامل ذکر شده باعث تغییرات جزئی ضریب شکست در طول فیبر و پراکندگی نور منتشره می گردند .

ب- پراکندگی مای:

پراکنده شدن نور از یک ذره همسانگرد، ایزوتروپیک و غیر مغناطیس با قطر دلخواه در محیطی غیر جاذب را پراکندگی می گویند که از نوع پراکندگی های غیر خطی است، در این پراکندگی ابعاد ذرات پراکنده شده از طول موج نور بزرگتر است و شکل ذره کروی در نظر گرفته می شود، هرگاه ابعاد ذره از طول موج کوچکتر بود از پراکندگی ریلی استفاده می شود که ۸۵٪ اتلاف در فیبر نوری را به خود اختصاص می دهد. به طور تقریب می توان از تلفات سایر پراکندگی ها صرف نظر کرد [۸].

۳-۱-۲-۲ پراکندگی غیر خطی:

پراکندگی خطی به دو نوع بریلوئن و رامان برانگیخته تقسیم می شود.

الف- پراکندگی رامان:

هنگامی که طول موج نور ورودی به فیبر به علت برخورد با مدهای ارتعاشی یا فونون های حرارتی مولکولهای تشکیل دهنده فیبر دچار تغییر می شود، پراکندگی رامان که یک پدیده غیر خطی ست به صورت خطوط ضعیفی در دو کناره تگ رنگ فرودی دیده می شود. با بررسی طیف رامان یک عنصر، فرکانس مدهای ارتعاشی آن مولکول قابل اندازه گیری است.تراز توان آستانه برای ایجاد پراکندگی رامان از رابطه زیر بدست می آید:

$$P_R = 5.9\times10^{-2} d^2 \lambda \alpha_{db} \qquad (۳-۶)$$

dقطر مغزی بر حسب μm، λ طول موج گسیل شده از منبع بر حسب μm، α_{db} افت فیبر بر حسب $\frac{db}{km}$ و P_Rتوان اپتیکی آستانه بر حسب ω است.[۷]

ب- پراکندگی بریلوئن:

زمانی روی می دهد که توان سیگنال به حدی برسد که ارتعاشات اکوستیک را در شیشه ایجاد کند. ارتعاشات اکوستیک چگالی ماده را تغییر می دهند، بنا بر این ضریب شکست آن ماده تغییر می کند، افت و خیزهای ضریب شکست پراکندگی نور می شود مه پراکندگی بریلوئن نام دارد و از آنجایی که امواج نوری پرتکنده شده خودشان امواج اکوستیک تولید می کنند این فرایند پراکندگی بریلوئن تحریک شده گفته می شود و زمانی روی می دهد که انتقال فقط از یک تک کانال صورت پذیرد، پراکندگی بریلوئن فقط در چگالی های توانی بیشتر از توان آستانه بروز می کند، که معادله تجربی زیر تراز توان آستانه را نتیجه می دهد:

$$P_B = 4.4\times10^{-3} d^2 \lambda^2 \alpha_{db} \Delta\tau \qquad (۳-۷)$$

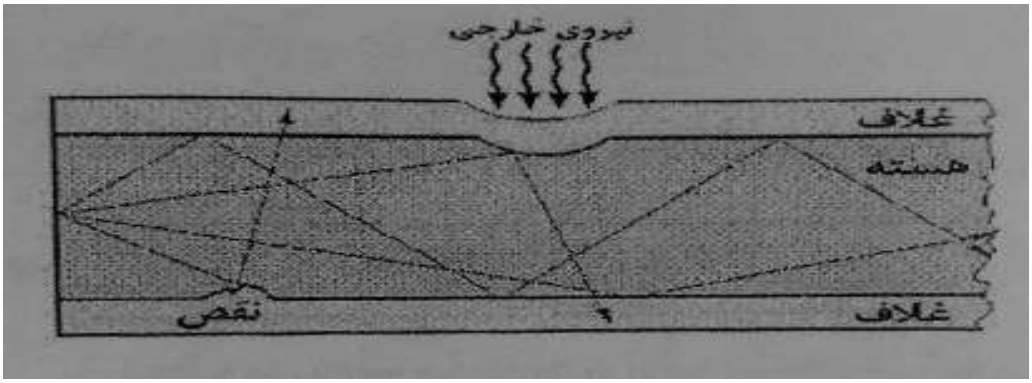
dقطر مغزی بر حسب μm، λ طول موج گسیل شده از منبع بر حسب μm، α_{db} افت فیبر بر حسب $\frac{db}{km}$، $\Delta\tau$ پهنای باند منبع بر حسب گیگا هرتز و آنگاه P_Bتوان اپتیکی آستانه بر حسب $m\omega$ می باشد.

همان طور که توان عبوری افزایش پیدا می کند، میزان توان پراکنده شده در جهت مخالف سریعا افزایش پیدا کرده و فیبر اشباع می شود. همواره: $P_R \rangle\rangle P_B$ است.[8]

۳-۱-۳ تلفات به علت ناهمورایهای مرز میان هسته و غلاف فیبر (تلفات مرزی)

۳-۱-۴ تلفات ناشی از خمش فیبر[19]:

عبور نور از یک خمش تند با شعاع بسیار کوچک، موجب اتلاف تشعشعات نوری می گردد.



شکل ۳-۴ تلفات ناشی از خمش فیبرنوری

خمیدگی هایی که در فیبر بوجود می آیند دو دسته تقسیم می شوند :

الف- خم های درشت[20]:

خمش هایی هستند که شعاع آنها در مقایسه با قطر فیبر بزرگ می باشند، نظیر خمش هایی که در کابل ها و در موقع عبور آنها از مسیرهای مختلف به وجود می آید و می توان جزء افت عارضی دانست، چون خمش هایی است که در زمان به کار گرفتن سیستم، خودمان بوجود می آوریم . تلفات تشعشعی در اثر وجود چنین خم هایی با توجه به شرایط نصب فیبر نوری و خمش کم و با شعاع های بسیار بزرگ، بسیار ناچیز می باشد و قابل توجه نیست. زمانی که شعاع خمش کوچک می شود. میزان تلفات به صورت نمایی افزایش می یابد تا این که شعاع خمش به حد بحرانی خود برسد و نور تماما از مسیر خارج شده و یا کاملا منعکس شود[۱].

شکل ۳-۵ خم‌های درشت

[19] Bend Loss
[20] Macro Bendings

ب- خم های ریز:

خمش های میکروسکوپی هستند که معمولا در موقع قرار دادن فیبر در کابل، حاصل می شوند. این نوع تلفات تشعشعی، در اثر ریز خمش های موجود در فیبر نوری در مراحل تولید و در زمان پوشش و یا کامل نمودن آن بوجود می آید. فیبر واقعی به صورت کاملا صاف نیست و دارای انحناء می باشد . این نوع تلفات جزء افت ذاتی فیبر می باشد. ریز خمش ها معمولا دراثر خمش مکرر فیبر در موقع قرار گرفتن در کابل و یا در اثر غیر یکنواختی روکش اولیه، که موجب خمیدگی فیبر در داخل آن می گردد به وجود می آیند. یکی از روش هایی که برای حداقل کردن تلفات ریز خمش ها در فیبر نوری به کار گرفته می شود این است که یک روکش ضخیم و نرم که بتواند فشار نیروی خارجی را خنثی کرده و کمتر به فیبر منتقل کند، روی فیبر کشیده می شود[۱].

شکل ۳-۶ خم های ریز

۳-۱-۵ تلفات ناشی از اتصال فیبر ها به یکدیگر(خم‌های ریز تلفات اتصال دائم و اتصال ساده[21]) :

برای انتقال در فواصل دور، لازم می شود فیبر های نوری به یکدیگر متصل شود و یا اینکه در محل اتصال، تکرار کننده ها به طول معینی برش خورده و به اجزاء دیگری متصل گردند، در محل اتصال، همه نور خارج شده از فیبر نوری اولی وارد فیبر دو می نمی شود و باعث تلفات اتصال می گردد.[۹]

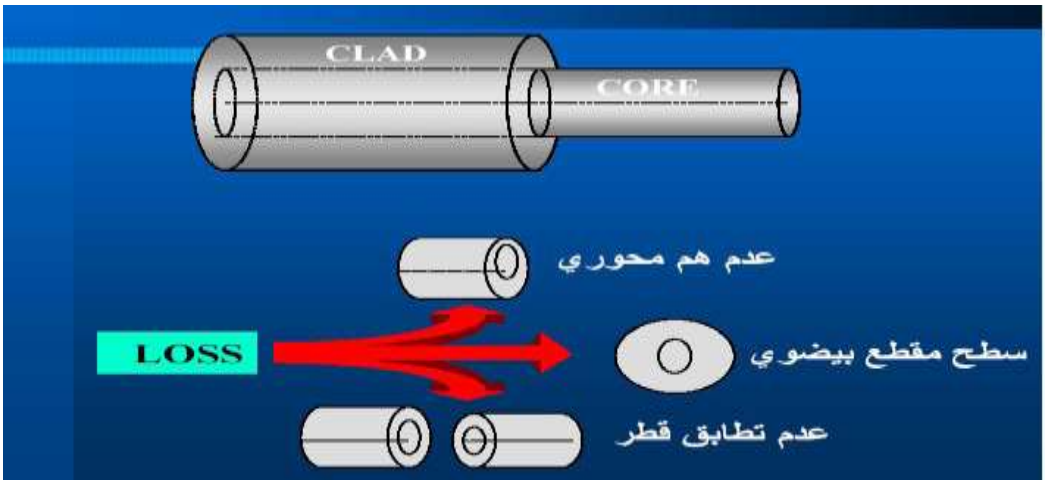
در نقطه اتصال شاید بخشی از نور به داخل گیرنده فیبر وارد نشود و از سطح مشترک انتهای فیبرها بازتاب داده شود، علت تلفات تغییر پله ای ضرایب شکست است که به این تلفات و بازتابها در نقطه اتصال بازتاب فرنل گویند، در رابطه زیر بازتاب جزئی برای پرتو عمودی نشان داده می شود. R کسر نور بازتاب شده از سطح مشترک، n ضریب شکست محیط بین دو فیبر و n_1 ضریب شکست مغزی فیبر نوری است.

$$R=\left[\frac{(n_1-n)}{(n_1+n)}\right]^2 \qquad (۳-۸)$$

تلفات مربوط به یک سطح مشترک از رابطه زیر مشخص می شود:

$$\alpha=-10\log(1-R) \qquad (۳-۹)$$

[21] Joint & Splices Loss



شکل ۳-۷ تاثیر شکل هندسی

دو فاکتور مهم در تلفاتی که در اثر اتصال فیبر ها ایجاد می شوند: تفاوت ساختاری و ذاتی دو فیبر.

۳-۱-۵-۱ عوامل خارجی که ناشی از تکنیک کار مفصل بندی است و عبارتند از:

الف- تکنیک برش فیبر های نوری:

- **غیر هم محوری زاویه ای(برش زاویه دار):** چنانچه برش انتهایی دو فیبر نوری از مفصل کج و زوایه دار باشد، خود به خود تلفات مفصلی به وجود خواهد آمد. شکل (۴-۷)

بازدهی تزویج حاصل از غیر هم محوری زاویه ای کوچک در فیبرهای چند مد ضریب پله ای برابر رابطه زیر است:

$$\eta = 1 - \frac{n.\theta}{\pi na} \qquad (۱۰-۳)$$

که در آن n ضریب شکست ماده ای ست که شکاف بین دو هسته را پر کرده و θ زاویه غیر هم محوری بر حسب رادیان است. در این حالت برای تلفات رابطه ی زیر برقرار می باشد:

$$\eta = -\log_{10}^{\left(1-\frac{n}{\pi na}\right)} \qquad (۱۱-۳)$$

تلفات ناشی از غیر هم محوری زاویه ای برای گشودگی عددی بزرگتر کاهش می یابد زیرا فیبرها با گشودگی عددی بزرگتر تابش گسیلی خود را در یک بازه گسترده پخش می کنند.[پالاییس، ۲۸۹]

ب- تکنیک تعادل و تساوی قطر هسته هاوهم ترازی انها در روش دستی:

با به کارگیری دستگاههای اتوماتیکی که در این زمینه ساخته و تهیه گردیده اند. هیچگونه عدم تطابق محوری در فیبر هایی که باید متصل شوند، به وجود نمی آید. اما چنانچه این عمل به صورت دستی صورت گیرد، ایجاد هم محوری بین دو هسته، بستگی به مهارت شخصی خواهد داشت .

- **عدم تطابق قطر:** اگر فیبرهایی با دو قطر متفاوت به هم اتصال داده شوند و قطر فیبر فرستنده بیشتر از قطر فیبر گیرنده باشد در محل اتصال تلفات ایجاد نمی شود اما در حالت عکس آن چنانچه شعاع فیبر اول a_1 و شعاع فیبر دوم a_2 باشد با فرض $a_1 \rangle a_2$: برای محاسبه اتلاف در محل اتصال خواهیم داشت:

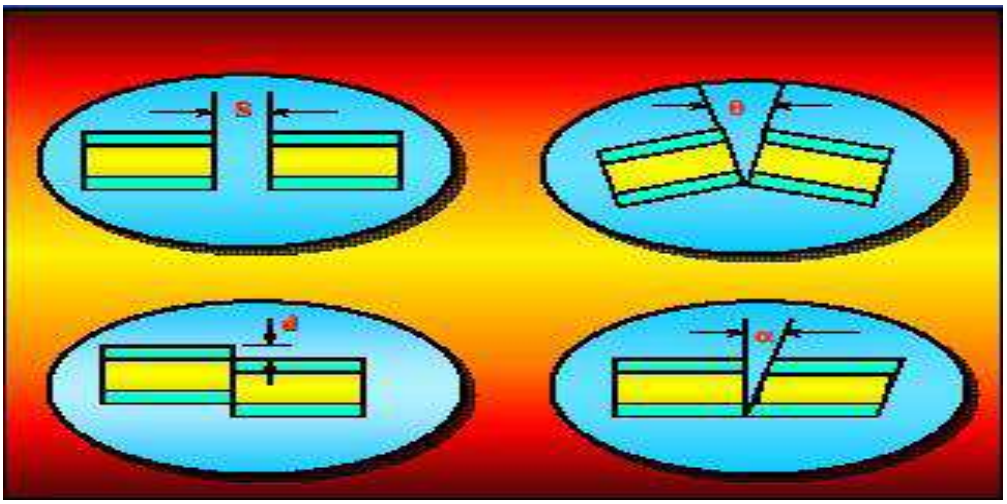
$$Loss = -10\log\left(\frac{a_2}{a_1}\right) \qquad (۱۲-۳)$$

در انتقال با گشودگی عددی بالا به فیبری با گشودگی عددی کمتر تعدادی از پرتوها از فیبر فرستنده خارج از زاویه پذیرش فیبر گیرنده خواهد بود که تلفات محل اتصال در آنها برابر رابطه (۴-۱۱) است: لازم به ذکر است چنانچه گشودگی عددی فیبر گیرنده بزرگتر از فرستنده باشد در محل اتصال تلفاتی نداریم.

$$Loss = -10\log\left(\frac{NA_2}{NA_1}\right)^2 \qquad (۱۳-۳)$$

ج- کنترل شرایط انجام کار و ترتیب آنها:

غیر هم محوری عرضی: یکی از عوامل ایجاد تلفات در اتصالات ، جابه جایی محورهای دو فیبر می باشد اگر مقدار جابه جای محورها کمتر از ۱۰٪ شعاع هسته فیبر می باشد، تلفات اتصال چندان قابل ملاحظه نخواهد بود. از این نظر فیبر های دارای شعاع هسته بزرگ، از نظر تلفات اتصال بهتر می باشند . در مورد فیبر تک حالته که شعاع هسته آن بسیار کوچک می باشد، مقدار اتصال بیشتر است، زیرا مرکز هسته ها، حتی اگر فیبرها با دقت بسیار زیاد هم تنظیم گردند، باز هم به طور کامل بر هم منطبق نخواهند شد. شکل (۴-۷)



شکل ۳-۸ تاثیرات هندسی برش

فرض می شود توان به صورت یکنواخت در سطح مغزی فیبر توزیع داده شده است، با توجه به این فرض تلفات غیر هم محوری عرضی فقط به دلیل نا هم پوشانی مغزی فیبرهای فرستنده و گیرنده می باشد که در اینصورت بازدهی تزویج به صورت رابطه زیر محاسبه می شود:[۱۰]

$$\eta = \frac{2}{\pi}\left(\cos^{-}\left(\frac{d}{2a}\right) - \frac{d}{2a}\sqrt{\left[1-\left(\frac{d}{2a}\right)^{2}\right]}\right) \qquad (۱۴-۳)$$

که در آن جمله اول بر حسب رادیان است. تلفات در اینجا بر حسب db برابر است با:

$$L = -10\log_{10}^{\eta} \qquad (۱۵-۳)$$

۳-۱-۶ اتلاف در برخی از کانکتورها:

کانکتوریکی از مهمترین قطعات شبکه فیبر نوری است که به انتهای فیبر متصل می گردد و اجازه می دهد نور به فیبر دیگر،کارت شبکه ویا دیگر اجزاء شبکه انتقال یابد. هر کانکتور مقداری اتلاف در شبکه ایجاد می کند که مقدار آن بر حسب نوع کانکتور، شیوه اتصا ل کانکتور به فیبر، نحوه سمباده زدن ۲۲ (بعد از نصب کا نکتور برای اینکه اتلاف به پا یین ترین حد خود برسد، سر طوقه را سمباده می زنند که به این عمل اصطلاحا پا لیش زدن می گویند که به صورت دستی یا ماشینی می تواند صورت گیرد.) و حتی تعداد تکرار سمباده متفا وت است[۲]

۳-۱-۶-۱ اتلاف در کانکتور به دو صورت وجود دارد:

الف- اتلاف داخلی:

این اتلاف زمانی پیش می آید که نور به کانکتور وارد شده و دچار افت می شود.

ب- اتلاف یا انعکاس برگشتی:

هنگامی که کانکتور را پالیش می زنیم سر طوقه کانکتور و فیبر به صورت یک سطح صاف و آیینه ای در می آیند و هنگامی که نور در حال وارد شدن به کا نکتوراست، مقداری از آن به دلیل این سطح آیینه ای انعکاس پیدا می کند به آن انعکاس برگشتی می گویند در هنگام پالیش زدن کا نکتور، به هر مقدار که کانکتور بهتر پالیش بخورد و سر فیبر سالم تر بمانند مقدار اتلاف داخلی کمتر در مقابل انعکاس بر گشتی بیشتر می شود.ولی در کل هر چه بیشتر پالیش بخورد میزان اتلاف کل در شبکه کاهش می یابد.

۴- نتیجه گیری:

بحث تلفات در فیبر نوری که مورد بحث قرار گرفت سبب اتلاف و هدر رفتن مدهای نوری شده که در جهت رفع این مقوله ها همانطوری که در پایان هر قسمت بیان شد، با توجه به نوع اتلاف و تضعیف می بایست مکانیسمی در نظر گرفته شود که اتلاف را به حداقل رسانده و بتوان اصل پالاس ارسالی را بدون تلفات دریافت نمود.

منابع

۱. پالاییس،جوزف سی، مخابرات فیبر نوری، ۱۳۸۸، ترجمه دکتر فرامرز اسمعیلی سراجی، چاپ اول، تهران، نشر دانشگاه بال.

[22] Polish

۲. اسمعیلی سراجی، ف.، ۱۳۸۷.مخابرات نوری (فیبر، کابل و ادوات)، نشر چکامه.

منابع انگلیسی:

3. S.S. Ball, B. E .A . Saleh, 1991, Element Photonics, (New York: john Wiley & Sons, volume8).
4. A. De, 2003, optical fiber and laser principles and applications, (New Delhi: New Age).
5. Hui, R. Q. , (2009), Fiber Optic Measurment Techn ique, Optical Fiber Measurment, PP.365-479
6. A.Ghatak, K. Thyagarajan, 1998, Introduction to fiber optics,(Cambridge University)
7. Dina, P. , T. , Milot, G. , (2005), Encyclopedia Of Modern Optics, Scattering Phenmena In Optical Fibers, PP. 321-325.
8. Litch, E. , Friesem, A. , A. , (1987), Optical Communuications, Simulated Brillouin Scattering Excited By A Multimode Laser In Single-Mode Optical Fiber, Vol. 64, Issue 6, pp. 544-548.
9. [Van Etten, w. , and Lambo , w. , and Simons, p. , (1985), Loss in Multimode Fiber Connections, With a Gap, Applied Optics, Vol. 24, pp. 970- 976.
10. Criip J, and Elliott B, (2005), Introduction to Fiber Optics, 3thed, GRET Britain