



دانشگاه تبریز

دانشکده مهندسی برق و کامپیوتر

گروه الکترونیک

پایان نامه

برای دریافت درجه کارشناسی ارشد در رشته مهندسی برق - الکترونیک

عنوان

تحلیل و طراحی فیبرهای نوری مالتی کلد برای پاشندگی تخت و پیشنهاد روابط  
تحلیلی برای طراحی بهینه

استادان راهنما

دکتر علی رستمی

دکتر ضیاءالدین دائی کوزه کنانی

استاد مشاور

دکتر نصرت الله گرانیپایه

پژوهشگر

سیده شیوا نجاتی

تیر ۱۳۸۷

به نام خالق، هستی

به پدر و مادر عزیزم

- از استاد گرانقدر جناب آقای دکتر رستمی که با نظرات ارزنده خود در کلیه مراحل پایان نامه عامل اصلی در پیشبرد آن بودند و در طول دوران تحصیل نیز حمایت های بی دریغ و راهنمایی های ارزشمندشان همواره روشنگر راهم بوده و همچنین نوع دیگر آموختن را از ایشان آموختم، نهایت سپاس و قدردانی را دارم.
- بر خود لازم می دانم زحمات استاد عزیز جناب آقای دکتر کوزه کنانی را ارج نهاده و از ایشان به خاطر مساعدت هایشان تشکر و قدردانی نمایم.
- از جناب آقای دکتر گرانیپایه که مشاوره این پایان نامه را بر عهده داشتند، تشکر می کنم.
- از جناب آقای دکتر نامدار که قبول زحمت نموده و داوری این پایان نامه را بر عهده گرفتند کمال تشکر را دارم.
- تقدیر و سپاس بی پایان از پدر و مادر عزیزم که همواره باعث افتخار من بوده و هستند، و بزرگ ترین مشوق من در طی دوران تحصیل بوده اند و همه داشته هایم را مرهون و مدیون آن بزرگوارانم.
- از خواهرم شیده که همواره باعث دلگرمیم بوده و هست، و خواهرم شیما که همیشه بر شادمانیم افزوده قدردانی می کنم.

نام خانوادگی دانشجو: نجاتی	نام: سیده شیوا
<p>عنوان پایان نامه: تحلیل و طراحی فیبرهای نوری مالتی کلد برای پاشندگی تخت و پیشنهاد روابط تحلیلی برای طراحی بهینه</p>	
<p>استادان راهنما: دکتر علی رستمی، دکتر ضیاءالدین دائی کوزه کنانی  استاد مشاور: دکتر نصرت الله گرانیپایه</p>	
<p>مقطع تحصیلی: کارشناسی ارشد رشته: مهندسی برق گروه: الکترونیک دانشگاه: تبریز  دانشکده: مهندسی برق و کامپیوتر تاریخ فارغ التحصیلی: ۸۷/۴/۲۹ تعداد صفحه: ۹۵</p>	
<p>کلید واژه‌ها: فیبرنوری تک مد چند لایه ، پاشندگی، شیب پاشندگی، تلفات خمشی، الگوریتم اجتماع ذرات</p>	
<p><b>چکیده</b></p> <p>مخابرات اطلاعات سرعت بالا یکی از نیازهای جدی پردازش بلادرنگ است. مخابرات مبتنی بر فیبر نوری یکی از بهترین گزینه ها برای این هدف است. با این وجود این فیبرها از اشکالاتی مانند پاشندگی، شیب پاشندگی و تلفات خمشی رنج می برند. اخیرا سیستم های انتشار سیگنال نوری چند کاناله مانند OTDM و DWDM در صنعت مورد نیاز هستند. بنابراین با توجه به این کاربردها فراهم نمودن مخابرات با سرعت و پهنای باند بالا با استفاده از فیبرهای نوری بسیار جالب توجه است. در این پایاننامه فیبرنوری به لحاظ پاشندگی، شیب پاشندگی، وابستگی دو پارامتر فوق به تغییرات دمایی و تلفات خمشی مورد بررسی، مطالعه و طراحی قرار گرفته است. قابل ذکر است که وابستگی پاشندگی و شیب پاشندگی به تغییرات دمایی پیش از این مورد مطالعه قرار نگرفته بود. برای استخراج پارامترهای نوری و هندسی بهینه و در نتیجه بمنظور طراحی از الگوریتم بهینه سازی استفاده شده است در نتیجه در هر یک از حالات طراحی بهترین حالت عملکرد فیبر بدست آمده است. به منظور بهینه سازی از الگوریتم بهینه سازی اجتماع ذرات (PSO) با تابع هزینه وزن دار شده</p>	

استفاده شده است. مقایسه نتایج نشان می دهد که الگوریتم PSO نسبت به الگوریتم ژنتیک که قبلا برای بهینه سازی و طراحی مورد استفاده قرار گرفته بود، موثرتر است. علاوه بر آن استفاده از این الگوریتم به دلیل پارامترهای قابل تنظیم کمتر نسبت به الگوریتم ژنتیک ساده تر نیز می باشد. وزن دار کردن حضور هر یک از پارامترهای پاشندگی، شیب پاشندگی و تلفات خمش در تابع هزینه باعث شده است که بر حسب کاربرد فیبر، پارامتر مورد نظر بهتر بهبود یابد.

## فصل اول بررسی منابع

۱	۱-۱ مقدمه
۲	۱-۲ فیبرهای نوری
۲	۱-۳ پارامترهای اصلی فیبر نوری
۳	۱-۴ مدهای فیبر، فیبرهای تک مد در برابر فیبرهای چند مد
۶	۱-۵ پاشندگی
۶	۱-۵-۱ پاشندگی مد داخلی
۷	۱-۵-۲ پاشندگی مد قطبی شده
۷	۱-۵-۳ پاشندگی تصادفی
۹	۱-۳-۵-۱ پاشندگی ماده
۱۰	۱-۳-۵-۲ پاشندگی موج بر
۱۳	۱-۶ تلفات فیبر
۱۳	۱-۶-۱ تلفات جذبی
۱۵	۱-۶-۲ تلفات پراکندگی
۱۵	۱-۶-۳ تلفات اتصال
۱۷	۱-۶-۴ تلفات خمشی

## فصل دوم مواد و روش ها

۲۱	۱-۲ بررسی ساختار فیبر W و M تک مد با روکش سه لایه
۲۱	۲-۲ تعاریف لازم برای مدل کردن ساختار فیبر W
۲۳	۱-۲-۲ آنالیز مدال
۲۵	۲-۲-۲ آنالیز پاشندگی و شیب پاشندگی
۳۵	۳-۲-۲ آنالیز تلفات خمشی
۴۲	۳-۲ تعاریف لازم برای مدل کردن ساختار فیبر M

۴۴	۱-۳-۲ آنالیز مدال
۴۶	۲-۳-۲ آنالیز پاشندگی و شیب پاشندگی
۵۱	۳-۳-۲ آنالیز تلفات خمشی
۵۳	۴-۲ الگوریتم اجتماع ذرات
۵۵	۱-۴-۲ الگوریتم PSO
<b>فصل سوم نتایج و بحث</b>	
۵۷	۱-۳ مدل سازی المان های ماتریس های معادله مشخصه
۵۸	۲-۳ بررسی تاثیر پارامترهای نوری و هندسی بر منحنی پاشندگی فیبرهای M و W
۶۴	۳-۳ طراحی فیبر W با استفاده از الگوریتم PSO
۸۰	۴-۳ بررسی وابستگی دمایی پاشندگی، شیب پاشندگی و تاثیر پارامترهای نوری و هندسی بر میزان این وابستگی در فیبر W
۸۹	۵-۳ طراحی فیبر W با بهینه سازی تغییرات دمایی
۹۰	نتیجه گیری
۹۱	پیشنهادات
۹۲	مراجع



- ۱۴ جدول (۱-۱): تلفات جذبی سیلیکا به ازای وجود ۱ppm اتم ناخالصی های مختلف
- ۲۳ جدول (۱-۲): توزیع میدان انتقالی برای نواحی متفاوت و ضریب شکست مؤثر نواحی
- ۴۵ جدول (۲-۲): توزیع میدان انتقالی برای نواحی متفاوت و ضریب شکست مؤثر نواحی
- ۵۸ جدول (۱-۳): وابستگی اجزای معادله (۳-۸۷) به پارامترهای هندسی
- ۵۸ جدول (۲-۳): وابستگی اجزای معادله (۳-۸۸) به پارامترهای هندسی
- ۵۸ جدول (۳-۳): وابستگی اجزای معادله (۳-۸۹) به پارامترهای هندسی
- ۵۸ جدول (۴-۳): وابستگی اجزای معادله (۳-۹۰) به پارامترهای هندسی
- ۶۷ جدول (۵-۳): بازه جستجو برای هر یک از متغیرها
- ۶۸ جدول (۶-۳): مقادیر پاشندگی به ازای ترکیب های مختلف  $C_i$  برای  $\sigma = 0$
- ۶۹ جدول (۷-۳): مقادیر شیب پاشندگی به ازای ترکیب های مختلف  $C_i$  برای  $\sigma = 0$
- ۷۰ جدول (۸-۳): مقادیر تلفات خمش به ازای ترکیب های مختلف  $C_i$  برای  $\sigma = 0$
- ۷۱ جدول (۹-۳): مقادیر پارامترهای نوری و هندسی
- ۷۲ جدول (۱۰-۳): مقادیر پاشندگی به ازای ترکیب های مختلف  $C_i$  برای  $\sigma = 1/2256e-8$
- ۷۳ جدول (۱۱-۳): مقادیر شیب پاشندگی به ازای ترکیب های مختلف  $C_i$  برای  $\sigma = 1/2256e-8$
- ۷۴ جدول (۱۲-۳): مقادیر تلفات خمش به ازای ترکیب های مختلف  $C_i$  برای  $\sigma = 1/2256e-8$
- ۷۵ جدول (۱۳-۳): مقادیر پارامترهای نوری و هندسی
- ۷۶ جدول (۱۴-۳): مقادیر پاشندگی به ازای ترکیب های مختلف  $C_i$  برای  $\sigma = 3/6935e-8$
- ۷۷ جدول (۱۵-۳): مقادیر شیب پاشندگی به ازای ترکیب های مختلف  $C_i$  برای  $\sigma = 3/6935e-8$
- ۷۸ جدول (۱۶-۳): مقادیر تلفات خمش به ازای ترکیب های مختلف  $C_i$  برای  $\sigma = 3/6935e-8$

- جدول (۳-۱۷): مقادیر پارامترهای نوری و هندسی ۷۹
- جدول (۳-۱۸): مقادیر گزارش شده  $H$  ،  $G$  و  $\lambda_g$  برای  $\text{SiO}_2$  ۸۰
- جدول (۳-۱۹): مقادیر پاشندگی برحسب دما در طول موج  $1/55\mu\text{m}$  به ازای سه مقدار مختلف  $\Delta$  ۸۱
- جدول (۳-۲۰): مقادیر شیب پاشندگی برحسب دما در طول موج  $1/55\mu\text{m}$  به ازای سه مقدار مختلف  $\Delta$  ۸۲
- جدول (۳-۲۱): مقادیر پاشندگی برحسب دما در طول موج  $1/55\mu\text{m}$  به ازای سه مقدار مختلف  $R_1$  ۸۳
- جدول (۳-۲۲): مقادیر شیب پاشندگی برحسب دما در طول موج  $1/55\mu\text{m}$  به ازای سه مقدار مختلف  $R_1$  ۸۳
- جدول (۳-۲۳): مقادیر پاشندگی برحسب دما در طول موج  $1/55\mu\text{m}$  به ازای سه مقدار مختلف  $R_2$  ۸۵
- جدول (۳-۲۴): مقادیر شیب پاشندگی برحسب دما در طول موج  $1/55\mu\text{m}$  به ازای سه مقدار مختلف  $R_2$  ۸۵
- جدول (۳-۲۵): مقادیر پاشندگی برحسب دما در طول موج  $1/55\mu\text{m}$  به ازای سه مقدار مختلف  $P$  ۸۶
- جدول (۳-۲۶): مقادیر شیب پاشندگی برحسب دما در طول موج  $1/55\mu\text{m}$  به ازای سه مقدار مختلف  $P$  ۸۷
- جدول (۳-۲۷): مقادیر پاشندگی برحسب دما در طول موج  $1/55\mu\text{m}$  به ازای سه مقدار مختلف  $Q$  ۸۸
- جدول (۳-۲۸): مقادیر شیب پاشندگی برحسب دما در طول موج  $1/55\mu\text{m}$  به ازای سه مقدار مختلف  $Q$  ۸۸
- جدول (۳-۲۹): نتایج شبیه سازی برای  $i=0...5$  ،  $C_i=0$  و  $\sigma=0$  ۸۹
- جدول (۳-۳۰): پارامترهای نوری و هندسی شبیه سازی برای  $i=0...5$  ،  $C_i=0$  و  $\sigma=0$  ۸۹

- شکل (۱-۱): فیبر نوری ۲
- شکل (۲-۱): منحنی تراز میدان اکتریکی برای همه مدهای هدایت یک فیبر با پروفایل ضریب شکست... ۴
- شکل (۳-۱): تابع مد یک فیبر تک مد با ضریب شکست پله ای ۵
- شکل (۴-۱): تابع مد یک فیبر چند مد با ضریب شکست پله ای ۵
- شکل (۵-۱): تغییرات ضریب شکست و ضریب گروه با طول موج برای سیلیکای خالص ۱۰
- شکل (۶-۱): منحنی جملات تشکیل دهنده  $D_W$  بر حسب طول موج ۱۱
- شکل (۷-۱): پارامتر پاشندگی کل  $D$  و پاشندگی ماده  $D_M$  و پاشندگی  $D_W$  برای فیبر تک مد استاندارد ۱۱
- شکل (۸-۱): وابستگی پارامتر  $D$  به طول موج برای فیبرهای استاندارد، فیبرها با پاشندگی ... ۱۲
- شکل (۹-۱): تغییرات تلفات نسبت به طول موج برای یک فیبر تک مد با پارامترهای... ۱۵
- شکل (۱۰-۱): انواع حالت های عدم انطباق در محل اتصال دو فیبر ۱۶
- شکل (۱۱-۱): نمای عرضی فیبر خمیده و سیستم مختصات  $(x, y, z)$  برای آنالیز خمش ۱۸
- شکل (۱-۲): ساختار WI ۲۲
- شکل (۲-۲): ساختار WII ۲۲
- شکل (۳-۲): نمای فیبر خمیده با دستگاه مختصات استوانه‌ای کلی  $(\hat{r}, \hat{\phi}, \hat{z})$  و دستگاه مختصات دکارتی ... ۳۹
- شکل (۴-۲): ساختار MI ۴۲
- شکل (۵-۲): ساختار MII ۴۳
- شکل (۱-۳): منحنی پاشندگی فیبر WI به ازای تغییرات پارامتر  $\Delta$  ۵۹
- شکل (۲-۳): منحنی پاشندگی فیبر WII به ازای تغییرات پارامتر  $\Delta$  ۵۹
- شکل (۳-۳): منحنی پاشندگی فیبر W به ازای تغییرات پارامتر  $R_2$  ۶۰
- شکل (۴-۳): منحنی پاشندگی فیبر WI به ازای تغییرات پارامتر Q ۶۱

- شکل (۵-۳): منحنی پاشندگی فیبر WI به ازای تغییرات پارامتر Q ۶۱
- شکل (۶-۳): منحنی پاشندگی فیبر MI به ازای تغییرات پارامتر  $\Delta$  ۶۲
- شکل (۷-۳): منحنی پاشندگی فیبر MII به ازای تغییرات پارامتر  $\Delta$  ۶۲
- شکل (۸-۳): منحنی پاشندگی فیبر M به ازای تغییرات پارامتر  $R_2$  ۶۳
- شکل (۹-۳): منحنی پاشندگی فیبر MI به ازای تغییرات پارامتر Q ۶۳
- شکل (۱۰-۳): منحنی پاشندگی فیبر I MI به ازای تغییرات پارامتر Q ۶۴
- شکل (۱۱-۳): نمودار پاشندگی به ازای ترکیب های مختلف  $C_i$  برای  $\sigma = 0$  ۶۹
- شکل (۱۲-۳): نمودار شیب پاشندگی به ازای ترکیب های مختلف  $C_i$  برای  $\sigma = 0$  ۷۰
- شکل (۱۳-۳): نمودار تلفات خمش به ازای ترکیب های مختلف  $C_i$  برای  $\sigma = 0$  ۷۱
- شکل (۱۴-۳): نمودار پاشندگی به ازای ترکیب های مختلف  $C_i$  برای  $\sigma = 1/2256e-8$  ۷۲
- شکل (۱۵-۳): نمودار شیب پاشندگی به ازای ترکیب های مختلف  $C_i$  برای  $\sigma = 1/2256e-8$  ۷۳
- شکل (۱۶-۳): نمودار تلفات خمش به ازای ترکیب های مختلف  $C_i$  برای  $\sigma = 1/2256e-8$  ۷۴
- شکل (۱۷-۳): نمودار پاشندگی به ازای ترکیب های مختلف  $C_i$  برای  $\sigma = 3/6935e-8$  ۷۶
- شکل (۱۸-۳): نمودار شیب پاشندگی به ازای ترکیب های مختلف  $C_i$  برای  $\sigma = 3/6935e-8$  ۷۷
- شکل (۱۹-۳): نمودار تلفات خمش به ازای ترکیب های مختلف  $C_i$  برای  $\sigma = 3/6935e-8$  ۷۸
- شکل (۲۰-۳): نمودار پاشندگی برحسب دما در طول موج  $1/55\mu m$  به ازای سه مقدار مختلف  $\Delta$  ۸۱
- شکل (۲۱-۳): نمودار شیب پاشندگی برحسب دما در طول موج  $1/55\mu m$  به ازای سه مقدار مختلف  $\Delta$  ۸۱
- شکل (۲۲-۳): نمودار پاشندگی برحسب دما در طول موج  $1/55\mu m$  به ازای سه مقدار مختلف  $R_1$  ۸۲
- شکل (۲۳-۳): نمودار شیب پاشندگی برحسب دما در طول موج  $1/55\mu m$  به ازای سه مقدار مختلف  $R_1$  ۸۳

- شکل (۳-۲۴): نمودار پاشندگی برحسب دما در طول موج  $1/55\mu\text{m}$  به ازای سه مقدار مختلف  $R_2$  ۸۴
- شکل (۳-۲۵): نمودار شیب پاشندگی برحسب دما در طول موج  $1/55\mu\text{m}$  به ازای سه مقدار مختلف  $R_2$  ۸۴
- شکل (۳-۲۶): نمودار پاشندگی برحسب دما در طول موج  $1/55\mu\text{m}$  به ازای سه مقدار مختلف P ۸۶
- شکل (۳-۲۷): نمودار شیب پاشندگی برحسب دما در طول موج  $1/55\mu\text{m}$  به ازای سه مقدار مختلف P ۸۶
- شکل (۳-۲۸): نمودار پاشندگی برحسب دما در طول موج  $1/55\mu\text{m}$  به ازای سه مقدار مختلف Q ۸۷
- شکل (۳-۲۹): نمودار شیب پاشندگی برحسب دما در طول موج  $1/55\mu\text{m}$  به ازای سه مقدار مختلف Q ۸۸

## فصل اول

---

### بررسی منابع

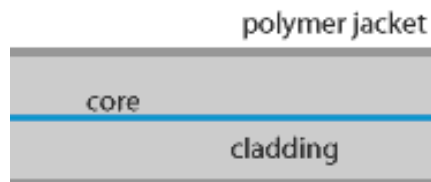
فیبرهای نوری می توانند برای انتقال داده در فواصل طولانی مورد استفاده قرار گیرند. سیستم-های مبتنی بر فیبر نوری، در مخابرات دور برد جایگزین سیستم های انتقال رادیویی شده اند. این سیستم ها به صورت گسترده در تلفن، اینترنت، شبکه های محلی با سرعت بالا<sup>۱</sup>، تلویزیون کابلی و حتی برای مسافت های کوتاه تر مورد استفاده قرار می گیرند.

در مقایسه با سیستم های مبتنی بر کابل الکتریکی، مخابرات فیبر نوری مزایای بسیاری دارند که در زیر به مهمترین آن ها اشاره می شود:

- ظرفیت انتقال فیبرها بسیار بالاست. فیبر سیلیکا تنها با مصرف بخش کوچکی از ظرفیت تئوری خود می تواند صدها هزار کانال تلفن را حمل کند. پیشرفت انجام شده در خصوص ظرفیت های انتقال اتصالات فیبر به طور قابل ملاحظه ای سریع تر از به عنوان مثال پیشرفت سرعت یا ظرفیت در کامپیوترها بوده است.
- تلفات انتشار نور در فیبر بسیار کم است.  $0.2 \text{ dB/Km}$  - برای فیبرهای سیلیکای تک مد. بنابراین سیگنال ها بدون نیاز به تقویت قادر به طی ده ها کیلومتر هستند.
- به دلیل نرخ انتقال بالای قابل دسترس، هزینه انتقال هر بیت به شدت کاهش می یابد.
- در مقایسه با کابل های الکتریکی، کابل های فیبرهای نوری بسیار سبک هستند، در نتیجه هزینه نصب آن ها بسیار کمتر است.
- کابل های فیبر نوری از مشکلات رایج کابل های الکتریکی مثل تداخل امواج مصون می-باشند.

## ۲-۱ فیبرهای نوری

فیبرهای نوری نوعی از موج برها هستند که معمولا از نوعی شیشه ساخته شده اند که پتانسیل طولی بودن (صدها کیلومتر) را دارند و در مقایسه با دیگر موج برها به طور قابل ملاحظه ای انعطاف پذیر هستند. شیشه ای که به طور معمول مورد استفاده قرار می گیرد، سیلیکا ( $\text{SiO}_2$  = دی-اکسید سیلیکون بی شکل) چه به صورت خالص یا با افزودن ناخالصی می باشد. سیلیکا به دلیل ویژگی های برجسته اش بخصوص تلفات انتشار بسیار پایین و استحکام مکانیکی بالا در برابر کشش و خمش به طور گسترده استفاده می شود [۱] و [۲].



شکل (۱-۱): فیبر نوری

## ۳-۱ پارامترهای اصلی فیبر نوری

طراحی فیبر با ضریب شکست پله ای تنها با دو پارامتر توصیف می شود، شعاع هسته  $a$  و اختلاف ضریب شکست  $\Delta n$ . البته معمولا از پارامتر  $NA^2$  که بیانگر قابلیت حبس نور در هسته فیبر است و به صورت زیر تعریف می شود، به جای  $\Delta n$  استفاده می شود. مقادیر نامی برای فیبرهای تک مد از مرتبه ۰/۱ و برای فیبرهای چند مد از مرتبه ۰/۳ است [۱].

---

<sup>۲</sup>numerical aperture



$$NA = \sqrt{n_{Core}^2 - n_{Cladding}^2} \quad (1-1)$$

پارامتر دیگری که مکررا استفاده می شود، فرکانس نرمالیزه ( $V$ ) است. تعداد مدها با  $V^2$  قیاس می شود.

$$V = \frac{\sqrt{\pi}}{\lambda} \cdot a \cdot \sqrt{n_{Core}^2 - n_{Cladding}^2} = \frac{\sqrt{\pi}}{\lambda} \cdot a \cdot NA \quad (2-1)$$

#### ۴-۱ مدهای فیبر، فیبرهای تک مد در برابر فیبرهای چند مد<sup>۶</sup>

تمایز بارز بین فیبرهای تک مد و چند مد در زیر آمده است [۲]، [۳]:

- فیبرهای تک مد معمولا هسته<sup>۵</sup> نسبتا کوچکی دارند (با قطر تنها چند میکرومتر) و اختلاف ضریب شکست هسته و لایه<sup>۶</sup> کم است. شعاع مد این فیبرها عموما در حد چند میکرون است و تنها می توانند یک مد فضایی را هدایت کنند. پروفایل در اغلب موارد تقریبا به شکل گوسین است. تغییر شرایط اعمالی تنها روی توان اعمالی به مد هدایت تاثیر می گذارد، در حقیقت توزیع فضایی نور خروجی از فیبر ثابت است. اعمال نور به فیبر تک مد عموما نیاز به یک منبع لیزر با کیفیت باریکه خوب و تنظیم دقیق کانونی کردن نور به منظور رسیدن به تطابق مد است.
- فیبرهای چند مد هسته بزرگ تری دارند و اختلاف ضریب شکست هسته و لایه آن بیشتر است. بنابراین چندین مد با توزیع شدت مختلف را تامین می کند (شکل ۲-۱). در این شکل رنگ ها به مقادیر متفاوت میدان الکتریکی اشاره دارند. مد مرتبه پایین تر ( $m=0, l=1$ ) که

<sup>۲</sup> single mode

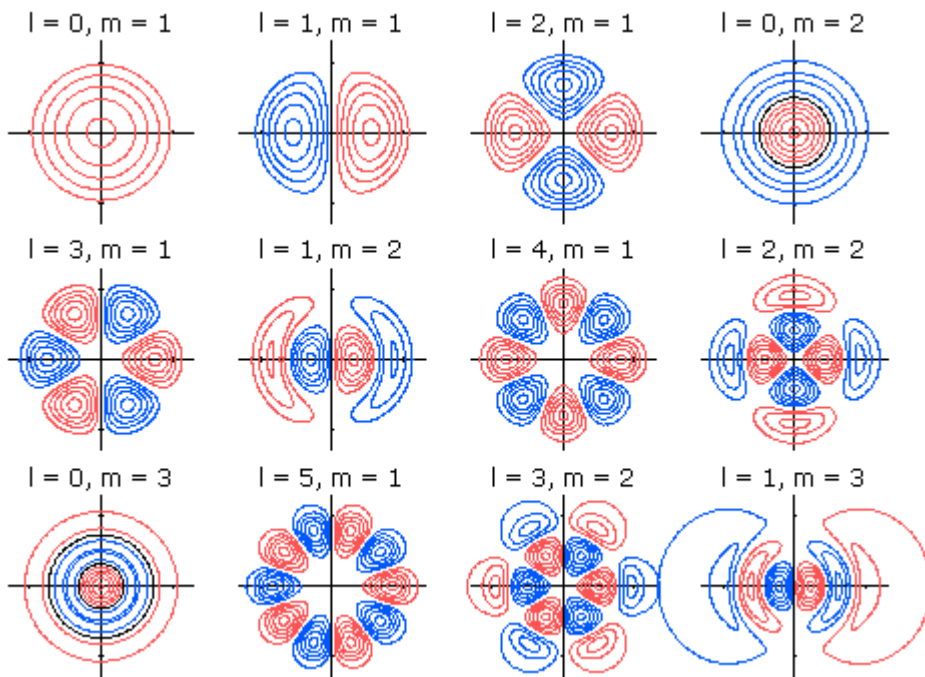
<sup>۴</sup> multimode

<sup>۵</sup> core

<sup>۶</sup> cladding

۱. LP خوانده می شود، پروفایل شدت مشابه با باریکه گوسین دارد. عموماً نور اعمالی به فیبر چند مد، چندین مد مختلف را برانگیخته می کند که می تواند موجب ایجاد شکل پیچیده ای شود. در این مورد پروفایل فضایی نور خروجی از هسته فیبر وابسته به شرایط اعمالی است که توزیع توان در مدهای فضایی را تعیین می کند [۳].

برای فیبرهای با ضریب شکست پله ای، شرایط هدایت تک مد با استفاده از فرکانس نرمالیزه، فرمول بندی می شود. به منظور هدایت تک مد فرکانس نرمالیزه باید کمتر از  $2/0.405$  باشد. این امر نیازمند شعاع هسته کوچک بخصوص در فیبرهای با NA بزرگ می باشد [۲].



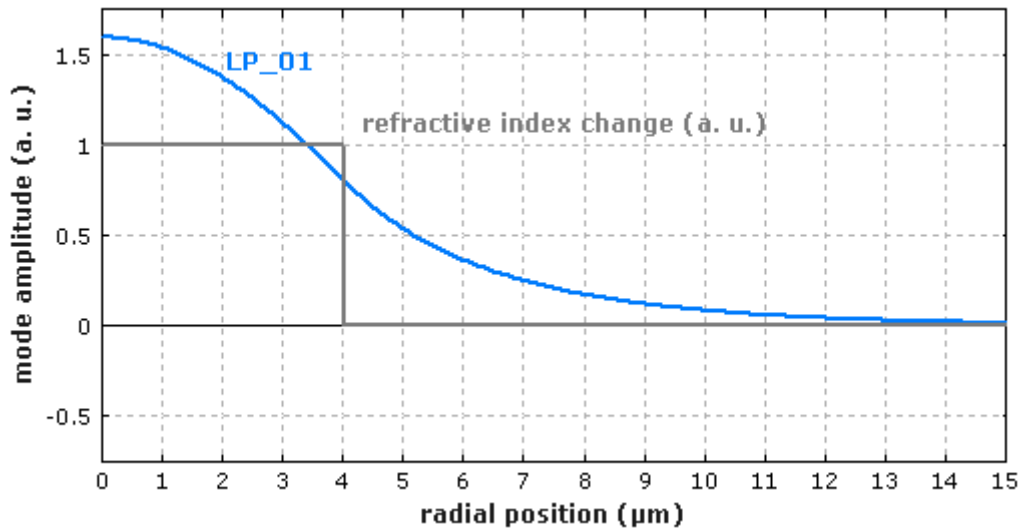
شکل (۲-۱): منحنی تراز میدان اکتریکی برای همه مدهای هدایت یک فیبر با پروفایل ضریب شکست top-hat

شکل (۳-۱) تابع مد یک فیبر تک مد با ضریب شکست پله ای را نشان می دهد. در این مورد

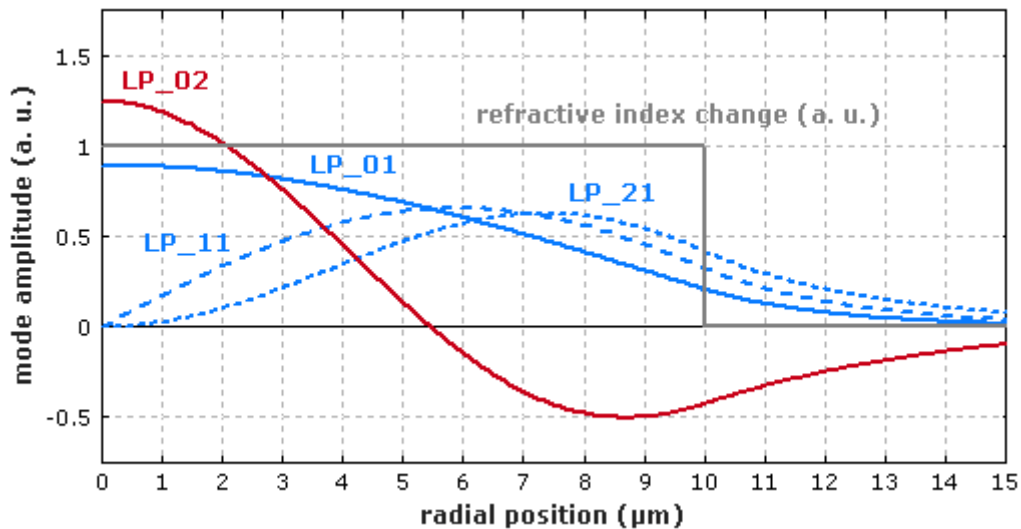
تغییر ضریب شکست  $0.02$  و شعاع هسته  $4\mu\text{m}$  است. در نتیجه فرکانس نرمالیزه در طول موج

$1\mu\text{m}$ ،  $1/95$  است [۲].

شکل (۴-۱) یک فیبر چند مد با ضریب شکست پله ای را نشان می دهد. در اینجا نیز مانند حالت قبلی تغییر ضریب شکست  $0.02$  است اما شعاع هسته بزرگ تر و  $10\ \mu\text{m}$  است. در نتیجه فرکانس نرمالیزه در طول موج  $1\ \mu\text{m}$ ،  $4/87$  بوده و فیبر چهار مد هدایت دارد [۲].



شکل (۳-۱): تابع مد یک فیبر تک مد با ضریب شکست پله ای



شکل (۴-۱): تابع مد یک فیبر چند مد با ضریب شکست پله ای

در سیستم های مخابرات فیبر نوری دور برد معمولاً از فیبرهای تک مد استفاده می شود زیرا سرعت گروه<sup>۷</sup> مختلف مدهای مختلف در نرخ های بالای اطلاعات، موجب تحریف سیگنال می شود.

### ۵-۱ پاشندگی<sup>۱</sup>

پاشندگی در فیبرها را می توان به دو صورت بیان کرد. از دیدگاه نور هندسی پهن شدگی پالس<sup>۹</sup> از مسیرهای متفاوت پیموده شده توسط اشعه های مختلف با زاویه تابش متفاوت حاصل می شود. در تعریف مدی، پهن شدگی پالس مربوط به ضریب شکست مؤثر متفاوت در ارتباط با مدهای مختلف می باشد. در این قسمت انواع پاشندگی مورد بررسی قرار گرفته است [۲].

#### ۱-۵-۱ پاشندگی مد داخلی<sup>۱۰</sup>

پاشندگی مد داخلی بدین معنی است که سرعت گروه انتشار مد در یک فیبر چند مد علاوه بر فرکانس نوری به مد انتشار نیز بستگی دارد. میزان این اثر به شدت وابسته به پروفایل ضریب شکست فیبر است. در سیستم های مخابرات فیبر نوری مبتنی بر فیبرهای چند مد، پاشندگی مد داخلی نرخ انتقال اطلاعات را به شدت محدود می کند.

یک روش بدیهی برای رهایی از این نوع پاشندگی استفاده از فیبرهای تک مد است. البته پاشندگی مد داخلی در فیبرهای چند مد با پروفایل ضریب شکست سهمی وار کمینه می شود [۲].

<sup>۷</sup> group velocity

<sup>۸</sup> Dispersion

<sup>۹</sup> Pulse broadening

<sup>۱۰</sup> Intermodal dispersion