



دانشگاه شهید باهنر کرمان

دانشکده علوم

گروه فیزیک

پایان نامه تحصیلی برای دریافت درجه کارشناسی ارشد فیزیک  
گرایش اتمی مولکولی

---

بالا بردن دقت در سیستم BOTDA با استفاده از روش ForWaRD

---

استاد راهنما:

دکتر علیرضا بهرامپور

مؤلف:

لیدا صفایی

تیرماه ۱۳۸۹

تقدیم به

پدرم

که پاک تر از آب روان است،

مادرم

که سبزتر از برگ درخت است،

و همسرم

که تجلی گاه عشق خداوندی ست.

## تقدیر و تشکر

حرف‌های ما هنوز ناتمام

تا نگاه می‌کنی وقت رفتن است

باز هم همان حکایت همیشگی

پیش از آنکه باخبر شوی

لحظه عزیمت تو ناگزیر می‌شود

ای دریغ و حسرت همیشگی

ناگهان چقدر زود دیر می‌شود!!!

سپاس بیکران ایزد یزدان را که فرصت آموختن و بهره‌مندی از محضر استاد فرهیخته و دانشمند، جناب دکتر علیرضا بهرامپور را به اینجانب عطا فرمود.

برخود لازم می‌دانم از پدر و مادر بزرگوایم، خواهران دلسوز و مهربانم، ویدا و آیدا و همچنین همسر عزیزم، پویان انصاری‌راد که همواره مرا مشوق و همدم و یار بودند کمال سپاس و قدردانی را به عمل آورم.

همچنین دوستانی که در روزگار علمی من همواره از وجودشان بهره برده و یار و مونس بودند، من جمله، لاله نیک‌خواه، کتایون آل‌شیخ، زهرا داوری و دیگر دوستانم سپاسگزارم.

## فهرست

صفحه	عنوان
۱	فصل اول: مقدمه.....
۲	۱-۱) پیشگفتار.....
۲	۲-۱) تاریخچه.....
۳	۳-۱) ساختار پایان نامه.....
۶	فصل دوم: فیبر نوری.....
۷	۱-۲) پیشگفتار.....
۷	۲-۲) فیبرهای نوری.....
۸	۱-۲-۲) فیبرهای تک مدی.....
۹	۲-۲-۲) فیبرهای چند مدی.....
۱۳	۳-۲) انواع فیبرها.....
۱۳	۱-۳-۲) فیبر ضریب پله‌ای.....
۱۳	۲-۳-۲) فیبر ضریب مدرجی.....
۱۳	۳-۳-۲) فیبر تک مدی.....
۱۴	۴-۲) بررسی مدهای موج هدایت شده توسط فیبر نوری.....
۱۸	۵-۲) طول موج قطع.....
۱۹	۶-۲) افت در فیبر نوری.....
۱۹	۱-۶-۲) افت ماده‌ای.....
۱۹	۲-۶-۲) افت پراکندگی.....
۱۹	۳-۶-۲) افت خمیدگی.....
۲۰	فصل سوم: بررسی پراکندگی بریلوین (BS).....

۲۱	..... پیشگفتار (۱-۳)
۲۱	..... پراکندگی های استوکس و پاد استوکس (۲-۳)
۲۳	..... پراکندگی بریلوین (۳-۳)
۲۵	..... بررسی پراکندگی در توصیف کوانتومی (۱-۳-۳)
۲۸	..... معادلات جفت شده بریلوین (۴-۳)
۲۹	..... طیف جذب بریلوین (BGS) (۵-۳)
۳۱	..... اثر دما و کرنش بر طیف جذب بریلوین (۱-۵-۳)
۳۲	..... آستانه بریلوین (۶-۳)
۳۳	..... کاربردهای SBS (۷-۳)
۳۳	..... ساخت لیزر (۱-۷-۳)
۳۴	..... تقویت کننده های اپتیکی (۲-۷-۳)
۳۴	..... حسگرهای فیبر نوری (۳-۷-۳)
۳۵	..... حسگرهای مبتنی بر شدت سنجی (۱-۳-۷-۳)
۳۵	..... حسگرهای مبتنی بر تداخل سنجی (۲-۳-۷-۳)
۳۶	..... حسگرهای مبتنی بر مد وپلاریزاسیون سنجی (۳-۳-۷-۳)
۳۶	..... حسگرهای مبتنی بر طیف سنجی (۴-۳-۷-۳)
۳۹	..... فصل چهارم: بالا بردن دقت در سیستم BOTDA با استفاده از روش ForWaRD
۴۰	..... پیشگفتار (۱-۴)
۴۰	..... سیستم و انواع آن (۲-۴)
۴۱	..... خواص اساسی سیستم ها (۱-۲-۴)
۴۲	..... سیستم OTDR (۳-۴)
۴۴	..... سیستم BOTDA (۴-۴)
۴۷	..... کانولوشن (۵-۴)

- ۴۷ ..... جمع کانولوشن ..... (۱-۵-۴)
- ۴۸ ..... انتگرال کانولوشن ..... (۲-۵-۴)
- ۴۹ ..... دی کانولوشن ..... (۶-۴)
- ۴۹ ..... دی کانولوشن به روش تبدیل فوریه ..... (۱-۶-۴)
- ۴۹ ..... دی کانولوشن به روش تبدیل ماتریسی ..... (۲-۶-۴)
- ۵۰ ..... نوفه در سیستم BOTDA ..... (۷-۴)
- ۵۰ ..... نوفه در سیگنال تابشی یا نوفه کوانتومی ..... (۱-۷-۴)
- ۵۱ ..... نوفه جریان تاریک ..... (۲-۷-۴)
- ۵۱ ..... نوفه ناشی از اجزای سیستم ..... (۳-۷-۴)
- ۵۱ ..... نوفه ناشی از دیجیتالی کردن داده‌ها ..... (۴-۷-۴)
- ۵۲ ..... نوفه و تکنیک دی کانولوشن ..... (۵-۷-۴)
- ۵۳ ..... تکنیک‌های کاهش نوفه ..... (۸-۴)
- ۵۳ ..... کاهش نوفه در پایه‌های فوریه ..... (۱-۸-۴)
- ۵۴ ..... کاهش نوفه در پایه‌های موجک ..... (۲-۸-۴)
- ۵۴ ..... موجک ..... (۱-۲-۸-۴)
- ۵۶ ..... انواع تبدیل موجک ..... (۲-۲-۸-۴)
- ۵۶ ..... تبدیل موجک پیوسته ..... (۱-۲-۲-۸-۴)
- ۵۶ ..... تبدیل موجک گسسته ..... (۲-۲-۲-۸-۴)
- ۵۶ ..... بررسی کاهش نوفه در پایه‌های موجک ..... (۳-۲-۲-۸-۴)
- ۵۷ ..... روش ForWaRD ..... (۹-۴)
- ۵۸ ..... استفاده از روش ForWaRD در سیستم BOTDA ..... (۱۰-۴)
- ۵۹ ..... فصل پنجم: شبیه‌سازی و نتایج ..... فصل پنجم: شبیه‌سازی و نتایج
- ۶۰ ..... پیشگفتار ..... (۱-۵)

۶۰ ..... شیه سازی (۲-۵)

۶۵ ..... نتیجه گیری (۳-۵)

۶۶ ..... منابع

# فصل اول:

## مقدمه



## ۱-۱) پیشگفتار

چنین به نظر می‌رسد که بشر در آستانه قرن جدیدی از مهندسی است. سیستم توزیع شده اندازه‌گیری و کنترل در موجودات زنده رهنمودهای جدیدی را در کلیه شاخه‌های علوم و مهندسی از جمله مهندسی سازه به همراه داشته است. نظارت بر سلامت سازه<sup>۱</sup> (SHM) در سال‌های اخیر در زمینه تحقیقات و همچنین استفاده از آن بسیار مورد توجه قرار گرفته است [۱].

به طور کلی یک سیستم نظارت بر سلامت سازه همواره شامل سه جزء اصلی است [۲]:

۱- سیستم حسگر<sup>۲</sup> - سیستم پردازش داده<sup>۳</sup> - سیستم سنجش سلامت

با ورود تکنولوژی فیبر نوری که یکی از هسته‌های تکنولوژی در قرن بیست و یکم می‌باشد، سیستم نظارت بر سلامت سازه نیز دستخوش تحولات شگرفی شد. همان‌طور که می‌دانیم توانایی بالای این تکنولوژی در انتقال و حمل اطلاعات در زمان بسیار کمی به ما اجازه انتقال اطلاعات را در سرتاسر جهان از طریق اینترنت داده است. اکنون هدف ما نشان دادن یکی دیگر از کاربردهای این تکنولوژی در سیستم نظارت بر سلامت سازه می‌باشد.

## ۱-۲) تاریخچه

در حوزه نظارت بر سلامت سازه توسط فیبر نوری ابتدا می‌توان به مقاله آقایان Butter و Hocker در سال ۱۹۷۸ اشاره نمود [۳]. آن‌ها در این مقاله به بررسی توانایی فیبر نوری در اندازه‌گیری کرنش ایجاد شده در یک سازه به روش تداخل سنجی پرداخته‌اند. این موضوع در سال ۱۹۸۳ توسط آقای Varnaham و همکارانش به صورت استفاده از حسگرهای موضعی ارتقا یافت [۴]. در سال ۱۹۸۴ توسط آقای Corke و همکارانش با استفاده از اصولی مشابه، حسگری موضعی به منظور اندازه‌گیری دما ساخته شد [۵]. این روند با ساخت حسگرهایی جدید با مقاصد نو ادامه یافت تا اینکه در سال ۱۹۹۰ استفاده از پراکندگی بریلوین برانگیخته در حسگرهای فیبر نوری توسط آقای Kurashima مطرح گردید [۶]. در سال ۱۹۹۷ اندازه‌گیری میزان جذب بریلوین در فیبر توسط آقای Kersey انجام گرفت [۷]. از آن به بعد نیز با

---

۱ - Structural Health Monitoring

۲ - sensor

پیشرفت تکنولوژی و علوم این حسگرها پیشرفت قابل توجهی نمودند. بررسی و کنکاش در مورد این موضوع بسیار جالب و حائض اهمیت در سازه‌ها توسط دانشمندان تاکنون ادامه دارد تا جایی که امروزه این سیستم بسیار مورد توجه قرار گرفته و جایگاه مهمی در زمینه نظارت بر سلامت سازه‌ها به خود اختصاص داده است.

برای محافظت از سازه‌های مهم در گذشته از مبدل‌های الکترونیکی (مقاومتی) استفاده می‌شد. حسگرهای الکترونیکی در محل‌های حساس سازه‌ها نصب شده و به طور موضعی مورد استفاده قرار می‌گرفتند. بدیهی است که تمام حسگرهای الکترونیکی به انواع تداخلات الکترومغناطیسی از قبیل رعدوبرق، حساس بوده و در مواقع بحرانی از انجام وظیفه ناتوان می‌مانند. از آنجا که این حسگرها به صورت موضعی مورد استفاده قرار می‌گرفتند، قادر به تهیه اطلاعات از کلیه نقاط سازه نبودند. اکنون برای رفع این ایرادات حسگرهای فیبر نوری مورد استفاده قرار می‌گیرند. این حسگرها دارای مزایای زیادی نسبت به حسگرهای الکترونیکی هستند. که از آن جمله به قطر بسیار کوچک فیبر، سبکی، حساسیت فوق‌العاده نسبت به درجه حرارت و کرنش، مقاوم در مقابل خستگی و خوردگی و امکان کار در پهنای باند وسیع می‌توان اشاره کرد. این حسگرها دارای توانایی اندازه‌گیری بسیاری از پارامترها از قبیل درجه حرارت، کرنش، فشار، فرکانس ارتعاشات و... می‌باشند. همچنین از این حسگرها می‌توان برای تشخیص خسارت‌های داخل ساختمان و محل آن به دلیل برخورد‌های خارجی، بار اضافی و خستگی استفاده کرد [۸].

### ۱-۳) ساختار پایان نامه

به منظور استفاده از سیستم تحلیل و تجزیه زمانی پراکندگی بریلوین در فیبر نوری (BOTDA)<sup>۱</sup> در حوزه نظارت بر سلامت سازه (SHM) در این پایان‌نامه به بررسی این سیستم و اجزای آن و پارامترهای موثر در اندازه‌گیری‌های آن خواهیم پرداخت.

از آنجایی که یکی از اجزای مهم موجود در هر سیستم حسگری، حسگر استفاده شده در آن سیستم می‌باشد، و در سیستم BOTDA، فیبر نوری به عنوان حسگر مورد استفاده واقع شده است، در فصل دوم ابتدا به بررسی انواع فیبرهای نوری و خصوصیات فیزیکی آن‌ها و برخی از

---

<sup>۱</sup> Brillouin Optical Time Domain Analysis

پارامترهای موجود مانند مدهای انتشار یافته در فیبر نوری، طول موج قطع در فیبر و هم‌چنین انواع افت‌های موجود که موجب کاهش انرژی سیگنال‌ها و یا پالس‌های فرستاده شده در فیبر می‌گردند، خواهیم پرداخت.

فرآیند دیگری که در بررسی سیستم حسگری BOTDA بسیار حائض اهمیت است و عملکرد این سیستم بر پایه آن شکل گرفته و این سیستم بر همین اساس نامگذاری شده است، پراکندگی بریلوین می‌باشد. بنابراین فصل سوم به بررسی این اثر غیر خطی اپتیکی اختصاص داده شده است. بدین صورت که ابتدا به بررسی انواع پراکندگی و سپس پراکندگی بریلوین و پارامترهای مهم این پراکندگی از جمله طیف جذب بریلوین، اثر دما و کرنش بر آن و حد آستانه به منظور وقوع این پراکندگی خواهیم پرداخت. و در انتها برخی از کاربردهای پراکندگی بریلوین مورد بررسی قرار خواهد گرفت.

پس از بررسی پارامترهای اساسی موجود در سیستم BOTDA که عملکرد این سیستم بر اساس آن می‌باشد، فصل چهارم به بررسی سیستم BOTDA و تکنیک‌های به کار برده شده به منظور افزایش دقت سیستم اختصاص داده شده است. در این فصل ابتدا به اختصار در مورد انواع سیستم‌ها و خواص آن‌ها مطالبی ارائه خواهد شد و در ادامه به بررسی سیستم OTDR<sup>۱</sup> که اساس و پایه دیگر حسگرهای توزیعی نیز بر پایه این سیستم می‌باشد، می‌پردازیم [۹]. سپس سیستم BOTDA مورد بحث و بررسی قرار خواهد گرفت. از آنجایی که این سیستم‌ها را به صورت سیستم‌های L.T.I<sup>۲</sup> مدل کرده و خاصیت مهم سیستم‌های L.T.I امکان استفاده از ضرب کانولوشن و تکنیک دی کانولوشن در آن‌هاست، به توضیح در مورد این تکنیک‌ها خواهیم پرداخت.

با توجه به اینکه استفاده از تکنیک دی کانولوشن موجب تقویت نوفه موجود در سیستم می‌گردد [۱۰]، انواع روش‌های کاهش نوفه در سیستم را مورد بررسی قرار می‌دهیم. سپس مفهوم موجک و تبدیل موجک که ابزاری توانمند در زمینه کاهش نوفه است، ارائه خواهد شد.

---

۱- Optical Time Domain Reflectometer

۲- Linear Time Invariant

در انتهای فصل از یک روش ترکیبی شامل آنالیز فوریه و موجک (روش ForWaRD) <sup>۱</sup> به منظور کاهش بهتر نوفه‌های موجود استفاده خواهیم کرد. سپس از این روش در سیستم BOTDA به منظور بالا بردن دقت سیستم استفاده می‌کنیم.

در فصل پنجم یک سیستم BOTDA را به روش نرم‌افزاری شبیه‌سازی کرده و با استفاده از روش نرم‌افزاری تکنیک دی‌کانولوشن به همراه آنالیز موجک با استفاده از شبیه‌سازی‌های کامپیوتری دقت سیستم BOTDA مورد بررسی قرار خواهد گرفت.

---

<sup>۱</sup> - Fourier-Wavelet Regularized Deconvolution

## فصل دوم:

### فیبِر نوری

## ۲-۱) پیشگفتار

از سال ۱۸۵۴ با استفاده از پدیده بازتاب داخلی کلی که پاسخی به هدایت نور در فیبرهای نوری است، فیبرهای نوری شناخته شده بودند. با این وجود فیبرهای نوری شیشه‌ای در دهه ۱۹۲۰ ساخته شدند و استفاده از آنها از دهه ۱۹۵۰، هنگامی که استفاده از لایه پوشش منجر به بهبود خصوصیات هدایتی فیبرهای نوری شد، عمومیت یافت [۱۱]. قبل از سال ۱۹۷۰ فیبرهای نوری فقط در علم پزشکی و مسافت‌های کوتاه کاربرد داشتند و استفاده از آنها به علت افت بسیار بالا (  $1000 \text{ dB/Km}$  )، در موارد دیگر به خصوص مخابرات و انتقال اطلاعات غیر ممکن به نظر می‌رسید. اما با کاهش دادن افت فیبرها تا حدود (  $20 \text{ dB/Km}$  ) در سال ۱۹۷۰ استفاده و به کارگیری آنها در مخابرات توسعه یافت [۱۲]. سپس در سال ۱۹۷۹ فیبرهایی با افتی در حدود (  $0.2 \text{ dB/Km}$  ) در طول موج (  $1.55 \mu\text{m}$  ) مورد استفاده قرار گرفتند [۱۳]. امروزه فیبرهای نوری افزون بر کاربردهای گذشته به عنوان حسگرهایی دقیق و حساس نیز مورد استفاده قرار می‌گیرند.

در این فصل ما به توضیح و شرح در مورد فیبرهای نوری و به بررسی خصوصیات مدهای هدایت شده و طول موج قطع در آنها خواهیم پرداخت. سپس خصوصیات فیزیکی و افت و در آنها را بررسی خواهیم کرد.

## ۲-۲) فیبرهای نوری

فیبرهای نوری اغلب وسایلی از جنس ترکیبات سیلیس می‌باشند و قطر آنها در حدود تار موی انسان است و نور را در مسافت‌های طولانی با افت بسیار کم منتقل می‌کنند [۱۴]. هم چنین می‌توان آنها را به گونه‌ای ساخت که به حالت و محیط اطراف خود حساس باشند و سپس از آنها به عنوان حسگر استفاده کرد. فیبرهای نوری دارای سه جزء می‌باشند:

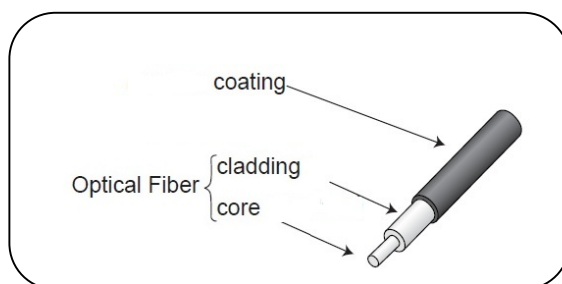
۱- هسته<sup>۱</sup>، ۲- پوشش<sup>۲</sup>، ۳- غلاف<sup>۳</sup>. شکل (۲-۱).

---

۱-core

۲-cladding

۳-coating



شکل (۱-۲) - نمای از یک فیبر نوری.

هسته فیبر نوری به عنوان هدایت کننده نور در طول فیبر به کار برده می شود و به وسیله یک محیط حلقوی پوششی احاطه شده است. قسمت پوششی دارای ضریب شکست پایین تری نسبت به هسته است و به عنوان محافظ هسته عمل می کند. نور در برخی از فیبرهای نوری می تواند تا دهها کیلومتر انتشار یابد که موضوع بسیار مهمی در صنعت مخابرات است و باید اذعان داشت که هنگام انتشار نور در هسته فیبر، مقدار کمی افت داریم. به طور کلی فیبرها علاوه بر پوشش دارای غلاف نیز می باشند تا از رطوبت محیط اطراف خود در امان بمانند (شکل ۲-۱). فیبرهای به کار برده شده در صنعت مخابرات دارای هسته ای با قطر  $(5 \mu m)$  و قطر پوشش  $(125 \mu m)$  و غلاف آن‌ها دارای قطری در حدود  $(250 \mu m)$  می باشد [۱۵]. نوری که اغلب درون این فیبرها حرکت می کند، دارای کمترین میزان افت است. طول موج این نور  $(1550 \mu m)$  است. چون در فیبرها مقداری از نور درون پوشش منتشر می شود، بنابراین پوشش باید دارای افت کم و ضخامت بسیار باشد.

فیبرهای نوری به طور کلی به دو دسته تقسیم می شوند:

۱- فیبرهای نوری تک مد      ۲- فیبرهای چند مد.

۱-۲-۲) فیبرهای تک مدی:

این فیبرها به وسیله توزیع ضریب شکست زیر مشخص می شوند:

$$n(r) = \begin{cases} n_1 & 0 < r < a & \text{هسته} \\ n_2 & r > a & \text{پوشش} \end{cases} \quad (1-2)$$

در فیبرهای تک مدی، نور در هسته ای بسیار کوچک محدود می گردد (قطر  $(10 - 5 \mu m)$ ، که البته به طول موج ورودی آن‌ها بستگی دارد.) و به صورت یک موج تخت عمود بر راستای

حرکت انتقال می‌یابد، و موجب کاهش پهن شدن پالس‌های نوری کوتاه می‌گردد، و هم باعث داشتن یک پهنای باند انتقال گسترده داشته باشیم. در حقیقت انرژی نور در یک فیبر تک مدی در یک مد متمرکز شده است. در حال حاضر فیبر تک مدی دارای کمترین افت و بالاترین نرخ انتقال اطلاعات است.

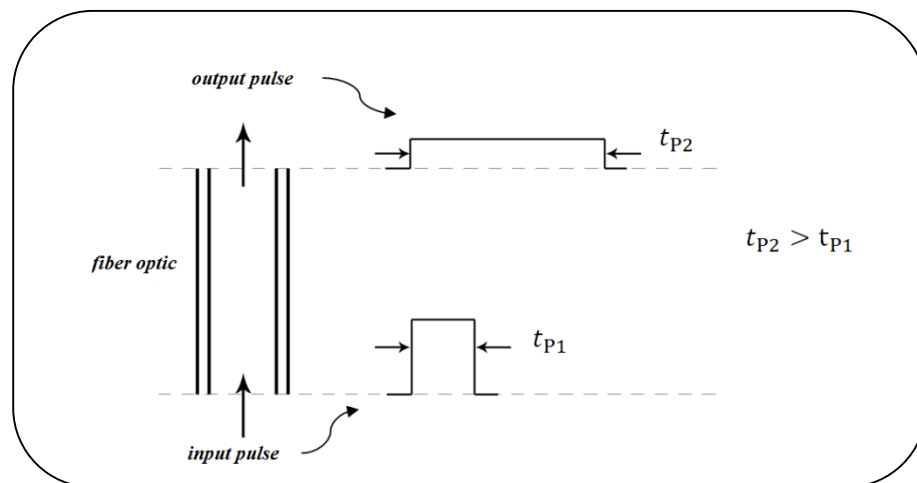
### ۲-۲-۲) فیبرهای چند مدی:

در این فیبرها، نور در چندین مد منتشر می‌شود و تعداد مدهای بیشتر یعنی پاشندگی بیشتر و این چنین پاشندگی، منجر به انتقال اطلاعات کمتری می‌شود. هم چنین نشت انرژی بیشتر رخ می‌دهد و بنابراین افت افزایش می‌یابد. باید متذکر شویم که به علت پاشندگی پهنای پالس خروجی پهن تر از پهنای پالس ورودی است (شکل (۲-۲)). البته پاشندگی کل فیبر به طول آن وابسته است [۱۶].

$$(2-2) \quad \text{پاشندگی کل فیبر} = L * (\text{پاشندگی/kilometer})$$

به طوری که در آن  $L$  طول فیبر می‌باشد و رابطه‌ی پاشندگی به صورت زیر است:

$$(3-2) \quad \Delta t = (t_{p2} - t_{p1})^{1/2}$$

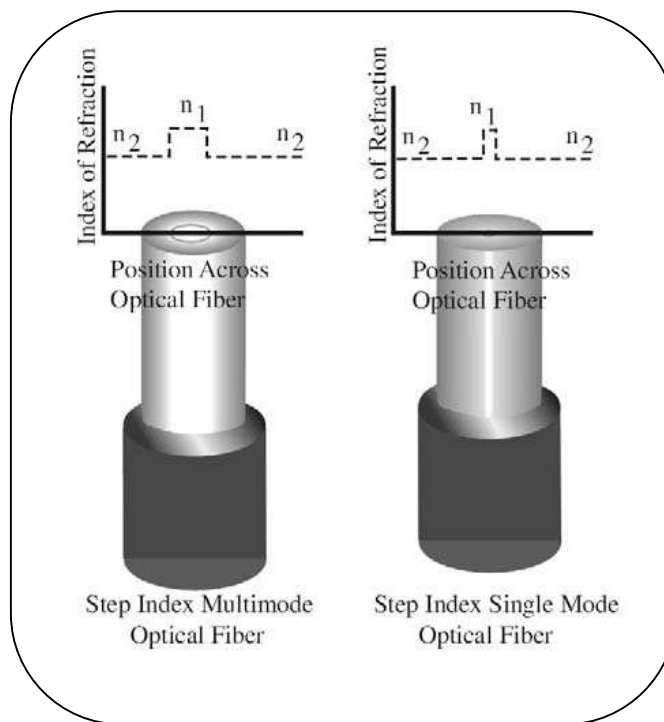


شکل (۲-۲)-به علت پاشندگی پهنای پالس خروجی پهن تر از پهنای پالس ورودی است.



این فیبرها می‌توانند توان بیشتری را نسبت به فیبرهای تک مدی مشابه حمل کنند و آن‌ها به طور معمول در حوزه‌های پزشکی و صنعتی مورد استفاده قرار می‌گیرند. زیرا این فیبرها، نور لیزر را با توان بالایی به یک هدف مشخص به منظور بریدن و یا جوش دادن منتقل می‌کنند. اغلب فیبرهای نوری در ضریب شکست خود دارای تغییرات شعاعی می‌باشند (شکل ۲-۳). این موضوع به نور منتشر شده اجازه می‌دهد تا رفتاری بسیار دقیق و استوار داشته باشد. نور فقط در صورتی در طول هسته فیبر نوری با ضریب شکست پله‌ای هدایت می‌شود، که از یکی از جوه ورودی با یک قیف زاویه‌ای که به وسیله زاویه قابل قبول،  $\theta_i$ ، تعیین می‌شود، وارد گردد. این زاویه به وسیله قانون اسنل برای شکست در سطح مشترک هوا / فیبر به زاویه بحرانی  $\alpha_c$ ، برای بازتاب داخلی در مرز هسته / پوشش، مرتبط می‌شود (شکل ۲-۴) [۱۷].

$$n_i \sin \theta_i = n_t \sin \theta_t \quad \text{قانون اسنل} \quad (۴-۲)$$



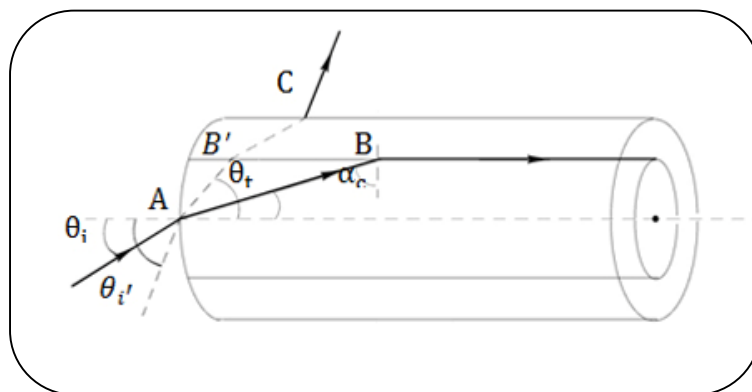
شکل (۲-۳) تغییرات شعاعی ضریب شکست فیبرهای نوری

در شکل (۴-۲) ما به بررسی دو اشعه می‌پردازیم. طبق قوانین شکست  $\theta_i < \theta_t$  است. پس اشعه وارد هسته می‌شود و از نقطه B به درون پوشش بیرونی نفوذ می‌کند و از نقطه C از فیبر

خارج می شود، اشعه خارج شده درون فیبر انتشار نمی یابد. اما برای اشعه دوم در نقطه A شکست رخ می دهد، و در نقطه B بین هسته و پوشش یک بازتاب داخلی کلی رخ داده و این اشعه به هسته فیبر محدود می گردد. زاویه ای که اشعه درون هسته با خط عمود تشکیل می دهد،  $\alpha_c$ ، را زاویه بحرانی می نامیم.

$$\alpha_c = \sin^{-1}(n_2/n_1) \quad (5-2)$$

$n_1$  ضریب شکست هسته و  $n_2$  ضریب شکست پوشش می باشد. بنابر این اشعه ورودی با زاویه ای بیشتر از  $\alpha_c$ ، درون فیبر منتشر نمی شود.



شکل (۴-۲) - انتشار نور در یک فیبر و تعیین زاویه بحرانی آن

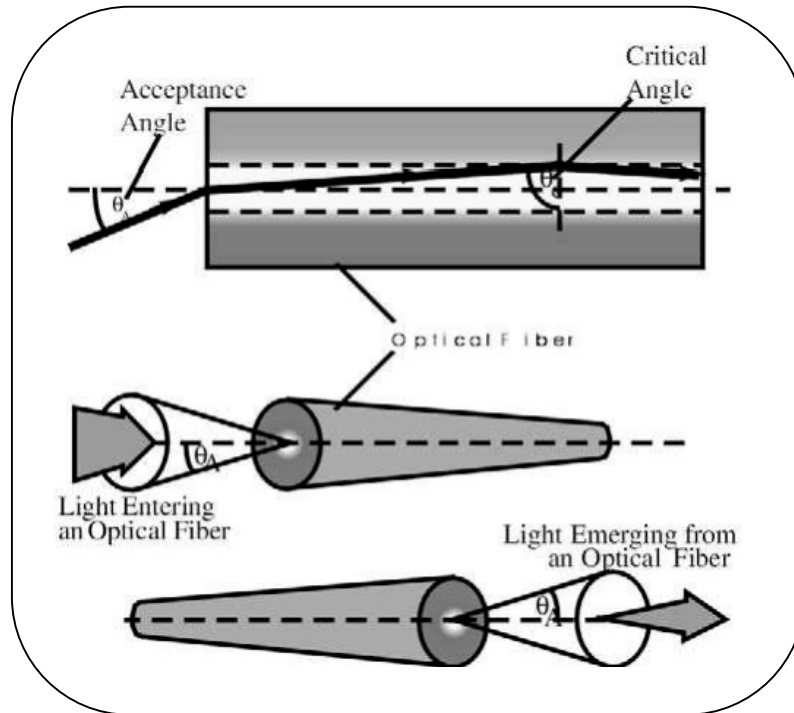
طبق قانون اسنل داریم:

$$\sin \theta_i = n_t \sin \theta_t \quad (6-2)$$

پس اشعه هایی که بین  $2\theta_i$  قرار دارند به درون فیبر راه می یابند، به  $\theta_i$  زاویه قابل قبول<sup>۱</sup> می گوئیم و در سه بعد آن را قیف قابل قبول<sup>۲</sup> می نامیم (شکل (۵-۲)) [۱۸].

۱ - Acceptance Angle

۲ - Acceptance Cone



شکل (۲-۵) - زاویه قابل قبول و قیف قابل قبول در یک فیبر نوری

پس می‌توانیم برای روزنه عددی<sup>۱</sup> ( $N.A$ ) یک فیبر نوری بنویسیم:

$$N.A = \sin \theta_a = \sqrt{n_1^2 - n_2^2} \quad (۲-۷)$$

با توجه به فرمول بالا هر چه  $N.A$  یک فیبر بزرگتر باشد یعنی زاویه قابل قبول آن بزرگتر است و نور بیشتری به درون فیبر راه می‌یابد.

<sup>۱</sup> -numerical aperture

## ۲-۳- انواع فیبرها

فیبرها ساختارهای متفاوتی دارند، که ما به بررسی سه ساختار از آن‌ها می‌پردازیم.

### ۲-۳-۱) فیبر ضریب پله‌ای<sup>۱</sup>:

در این فیبر ضریب شکست هسته و پوشش با یکدیگر متفاوت هستند و در هسته بیشتر و در پوشش کمتر است ( $n_2 < n_1$ ). در بخش بعدی به بررسی این فیبر خواهیم پرداخت. شکل (۲-۶-الف).

### ۲-۳-۲) فیبر ضریب مدرجی<sup>۲</sup>:

در این فیبر ضریب شکست از هسته به سمت پوشش متغیر است. سطح مقطع این فیبر در شکل (۲-۷) نشان داده شده است. در مرکز هسته ضریب شکست  $n_1$  و در قسمت پوشش  $n_2$  می‌باشد و در بین آن‌ها  $n(r)$ ، که بیانگر این است که  $n$  تابع مشخصی از  $r$  می‌باشد. در مرزهایی که توسط ضرایب شکست به وجود آمده است اشعه ورودی شکست می‌یابد و در آخر در ناحیه  $n_2$  اشعه می‌چرخد و کاملاً "بازتاب می‌شود. ساخت این فیبر بسیار سخت تر از فیبر ضریب پله‌ای مشابه آن است و کنترل ضریب شکست‌ها برای تولید ارتعاشات مناسب بسیار سخت است. زاویه قابل قبول فیبر ضریب مدرجی کمتر از فیبر ضریب پله‌ای مشابه آن می‌باشد و این موضوع جفت کردن فیبر را با چشمه بسیار مشکل می‌کند (شکل (۲-۶-ج)).

### ۲-۳-۳) فیبر تک مدی:

در مورد این فیبر قبلاً" به تفصیل صحبت کردیم (شکل (۲-۶-ب)) [۱۹].

---

۱-step-index fiber

۲-graded-index fiber