

بِسْمِ اللَّهِ الرَّحْمَنِ الرَّحِيمِ

11.7.2



دانشگاه اصفهان

دانشکده علوم

گروه فیزیک

پایان نامه ی کارشناسی ارشد رشته ی فیزیک گرایش اتمی و مولکولی

برپایه ی حسگر شیمیایی بر اساس بازتاب سنجی نوری در حوزه ی زمان

استادان راهنما:

دکتر محمود سلطان الکتابی

دکتر علیرضا خورسندی

پژوهشگر:

آذر گندم زاده

مهر ماه ۱۳۸۷

۱۱۰۷۰۶

۸۷/۱۱/۷۲۵۷

۸۷/۱۲/۲۱

کتابخانه اطلاعات مدرن علمی  
گروه فیزیک  
دانشگاه اصفهان

۸۲۸۷ / ۱۲ / ۲۱

کلیه حقوق مادی مترتب بر نتایج مطالعات،  
ابتکارات و نوآوری های ناشی از تحقیق  
موضوع این پایان نامه متعلق به دانشگاه  
اصفهان است.



دانشگاه اصفهان

دانشکده علوم

گروه فیزیک

پایان نامه ی کارشناسی ارشد رشته ی فیزیک گرایش اتمی و مولکولی  
خانم آذر گندمزاده  
تحت عنوان

برپایه حسگر شیمیایی بر اساس بازتاب سنجی نوری در حوزه ی زمان

در تاریخ ۸۷/۷/۲۹ توسط هیأت داوران زیر بررسی و با درجه عالی به تصویب نهایی رسید.

امضا  
امضا  
امضا

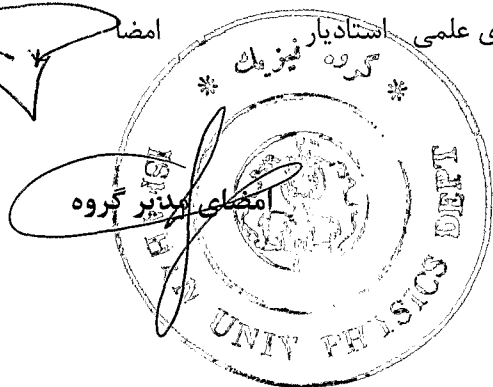
۱- استاد راهنمای پایان نامه دکتر محمود سلطان الکتابی با مرتبه ی علمی استاد

۲- استاد راهنمای پایان نامه دکتر علیرضا خورسندی با مرتبه ی علمی استادیار

۳- استاد داور داخل گروه دکتر احمد کیاست پور با مرتبه ی علمی استاد

۴- استاد داور خارج از گروه دکتر مسعود کاوش تهرانی با مرتبه ی علمی استادیار فیزیک گروه

امضا



پاس و ستایش خدای را که نیم زندگی بخش بر ما و زید و به بارش بی امان نعمت داد و بخشش بی انتهای الطافش سرایدمان بخشد. پاسی که ما را در طاعتش نیرو بخشد و در ادای حقش مدد رساند که هر چه داریم از لطفش و هر چه نداریم از حکمت اوست.

وظیفه خودی و انعم که از پدر و مادرم عزیزم که همیشه حمایت و تشویق شان در تمامی مراحل زندگی دگر می و پشتوانه راهم است و همچنین از برادر و خواهران مهربانم که همیشه مرا یاری رسانده اند، پاسگزاری کنم.

صمیمانه از اساتید محترم جناب آقای دکتر محمود سلطان الکتابی و جناب آقای دکتر علیرضا خورنندی که نهایت لطف را در امر راهنمایی رساله فرمودند، و بی شک بدون حمایت و راهنمایی اساتید ارجمندم این رساله به اتمام نمی رسید، پاسگزاری کنم. خداوند را شاکرم که افتخار شاکردی این بزرگواران را نصیب نمود.

از اساتید گرامی جناب آقای دکتر احمد کیاست پور و جناب آقای دکتر مسعود کاوش تهرانی که داور این رساله را به عهده گرفتند و همچنین اساتید گرامی گروه فزنی که در امر آموزش و انجام رساله مرا یاری دادند، نهایت تشکر را دارم.

از همندسین محترم دانشگاه صنعتی مالک اشتر به ویژه آقایان مرتضی جعفری، حسین پناهی و علی موسوی آذک که در طراحی و ساخت قطعات مکانیکی و دستگاه ها، تهیه ی طیف جذبی نمونه های شیمیایی و نیل به اهداف رساله مرا یاری رسانند و همچنین همندسین گروه شیمی دانشگاه اصفهان و صنایع اپتیک اصفهان و کسانی که در پیشبرد این تحقیق مرا یاری دادند، قدردانی و تشکر می کنم.

آذکندم زاده

مهرماه ۱۳۸۷

## تقدیم به ستاره‌های آسمان زندگیم

پدر عزیزم اسوه‌ی باشکوه تلاش و بزرگواری، پاسخی به زحمت بی‌دریغش و بوسه‌ای بردستان پر توانش،  
آن کوه بردباری که دانشم می‌یونستی اوست.

مادر مهربانم که وجودم همه برای اوست، الگوی صبر و ایثار که در تمام مراحل زندگی یار و مددکارم بوده  
است. آن نادره وجود که هر چه دارم می‌یون گذشت و بزرگواری اوست.

ستارگانی که فروغ نگاهشان و گرمی کلامشان سرمایه‌های جاودانی زندگی من است. آنان که وجودم برایشان  
همه رنج بود و وجودشان برایم همه مهر. در برابر وجود کرامت‌آنان زانوی ادب بر زمین زده و بادلی ملو از عشق، محبت  
و خضوع بردستانشان بوسه می‌زنم.

و تقدیم به تمامی کسانی که دوستان دارم.

## چکیده

بازتاب سنجی نوری در حوزه‌ی زمان روشی مناسب برای آشکارسازی اختلالات و عیوب ایجاد شده در تار نوری است. اساس عملکرد این روش مبتنی بر آشکارسازی تغییرات شدت پس پراکندگی ریلی برحسب زمان در طول تار است. به موجب ایجاد اختلال در هر نقطه از تار، نظیر نفوذ ماده شیمیایی به درون غلاف تار و تاثیر آن بر میدان محوشونده، شدت پس پراکندگی کاهش می‌یابد. کاهش شدت به صورت افت پله‌ای در سیگنال پاسخ بازتاب سنج در حوزه‌ی زمان مشاهده می‌شود.

غلاف تار PCS با هسته‌ی سیلیکایی و غلاف پلیمری نسبت به مواد هیدروکربنی نفوذپذیر است. بنابراین در این پژوهش با استفاده از سامانه‌ی بازتاب سنج نوری به طراحی حسگر شیمیایی شبه توزیع‌شده موج محوشونده پرداخته‌ایم. حسگر طراحی شده به منظور ردیابی هیدروکربن‌های خالص در محیط یا در آب و همچنین بررسی پاسخ حسگر نسبت به تغییرات ضریب شکست و غلظت آن‌ها به کار برده شده است. آشکارسازی نور پس پراکنده شده از محل نفوذ مواد هیدروکربنی به درون غلاف تار منجر به افت پله‌ای در سیگنال پاسخ می‌شود که بستگی به ضریب شکست و قطبیت نمونه شیمیایی دارد. با اندازه‌گیری افت در سیگنال برای مواد مختلف نظیر دی‌متیل سولفوکسید، دی‌کلرومتان، بنزیل الکل و غیره توانستیم حسگر را براساس نسبت ضریب شکست به قطبیت نمونه‌های مختلف و همچنین نسبت به غلظت‌های مختلف تولوئن مدرج نماییم.

با توجه به نتایج حاصل، حسگر طراحی شده برای ردیابی سریع مواد و آشکارسازی تغییر غلظت در صنایع و تاسیسات و آب‌های سطحی و زیرزمینی حسگری مناسب است.

**کلید واژه:** بازتاب سنجی نوری در حوزه‌ی زمان، پراکندگی ریلی، میدان محوشونده، تار نوری PCS، حسگر شیمیایی شبه توزیع‌شده

# فهرست مطالب

۱	پیشگفتار	
۲	نقش تارهای نوری در حسگرهای شیمیایی	۱
۲	مقدمه	۱-۱
۴	گشودگی عددی تار	۲-۱
۷	موجبر دی الکتریک استوانه‌ای و تارنوری ضریب پله‌ای	۳-۱
۷	مدهای استوانه‌ای دی الکتریک با مقطع دایره‌ای و یکنواخت	۱-۳-۱
۹	روابط پاشندگی	۲-۳-۱
۱۱	شرایط قطع	۳-۳-۱
۱۳	آرایش میدان‌ها	۴-۳-۱
۱۴	تارهای هدایت‌کننده‌ی ضعیف	۵-۳-۱
۱۸	تضعیف	۴-۱
۱۹	اتلاف‌های جذبی	۱-۴-۱
۲۰	اتلاف‌های تابشی	۲-۴-۱
۲۳	پاشیدگی تپ لیزری	۵-۱
۲۳	پاشیدگی میان‌مدی	۱-۵-۱



۲۴	پاشیدگی درون مدی	۲-۵-۱
۲۶	تار نوری به عنوان بخش اصلی حسگرهای شیمیایی	۶-۱
۲۸	حسگرهای میدان محوشونده	۲
۲۸	مقدمه	۱-۲
۲۸	میدان محوشونده	۲-۲
۳۰	عوامل تضعیف میدان محوشونده	۳-۲
۳۲	حسگرهای شیمیایی درونی مبتنی بر جذب میدان محوشونده	۴-۲
۳۴	گمانه‌ی مستقیم و یکنواخت	۱-۴-۲
۳۴	گمانه‌ی U شکل	۲-۴-۲
۳۶	گمانه‌ی باریک شده	۳-۴-۲
۳۸	گمانه صیقل داده شده	۴-۴-۲
۳۸	غلاف نفوذپذیر	۵-۴-۲
۳۹	حسگرهای توزیع شده مبتنی بر بازتاب سنجی نوری در حوزه‌ی زمان	۵-۲
۳۹	اساس حسگرهای توزیع شده	۱-۵-۲
۴۰	پس‌پراکنندگی ریلی اساس عملکرد OTDR	۲-۵-۲
۴۳	بازه دینامیکی یا پویایی سامانه‌ی OTDR	۳-۵-۲
۴۴	تفاوت‌های بین OTDR های چندمد و تک‌مد	۴-۵-۲
۴۶	انواع ساختارهای OTDR	۵-۵-۲
۵۰	حسگرهای با واسطه‌ی معرف	۶-۲
۵۰	روش‌های تثبیت‌سازی	۱-۶-۲

۵۳	تأثیر دما بر حسگر میدان محوشونده‌ی تار نوری	۷-۲
۵۴	بررسی پخش ماده‌ی شیمیایی در غلاف سیلیکونی حسگرهای تار نوری	۸-۲
۵۸	برپایی حسگر شیمیایی بر مبنای بازتاب سنج نوری در حوزه‌ی زمان	۳
۵۸	مقدمه	۱-۳
۵۸	چشمه نوری	۲-۳
۵۸	لیزر دیود	۱-۲-۳
۶۱	لیزر Nd:YAG	۲-۲-۳
۶۳	موازی ساز و کانونی کننده پرتو	۳-۳
۶۴	تقسیم کننده‌ی پرتو	۴-۳
۶۴	تار نوری	۵-۳
۶۵	اندازه‌گیری طیف تضعیف تار شیشه‌ای به روش Cut-Back	۱-۵-۳
۷۰	نگه‌دارنده‌ی تار نوری	۲-۵-۳
۷۱	برش‌دهنده‌ی تار	۳-۵-۳
۷۱	اتصال دهنده‌ی تار با اعمال قوس الکتریکی	۴-۵-۳
۷۲	طراحی سلول حاوی مواد شیمیایی	۶-۳
۷۳	آشکارساز	۷-۳
۷۵	برپایی سامانه‌ی بازتاب سنج نوری	۸-۳

۷۶	.....	مقدمه	۱-۴
۷۶	.....	بررسی پاسخ آشکارساز در پهناهای باند مختلف	۲-۴
۷۷	.....	تأثیر افزایش پهناهای تپ بر بازه‌ی پویایی	۳-۴
۷۹	.....	بررسی تأثیر افزایش پهناهای تپ لیزری بر پاسخ آشکارساز	۴-۴
۸۱	.....	ردیابی مکان نشت مواد هیدروکربنی	۵-۴
۸۵	.....	مدرج‌سازی حسگر نسبت به تغییرات ضریب شکست مواد هیدروکربنی خالص	۶-۴
۹۰	.....	آشکارسازی مواد هیدروکربنی در آب	۷-۴
۹۲	.....	بررسی پاسخ حسگر نسبت به تغییرات غلظت تولوئن	۸-۴
۹۳	.....	بررسی پاسخ حسگر نسبت به تغییر طول تماس تار با نمونه شیمیایی	۹-۴
۹۵	.....	نتیجه‌گیری	۱۰-۴

پیوست‌ها

الف مولفه‌های میدان در دستگاه مختصات استوانه‌ای براساس نظریه‌ی برهم‌نهی ۹۶

ب اتلاف تابشی ناشی از خمش تار

پ زمان گذر پرتو در تارنوری

۱۰۲

کتابنامه

۱۰۵

## فهرست شکل‌ها

۱-۱	انواع تارهای نوری	۲
۲-۱	نمایه ضریب شکست تار برای مقادیر مختلف $q$	۴
۳-۱	زاویه‌ی پذیرش و مسیر پرتوهای محوری	۵
۴-۱	مسیر پرتوهای پیچشی	۶
۵-۱	نمایش سطح مقطع بردارهای میدان الکتریکی عرضی	۱۳
۶-۱	نمایش توزیع چگالی توان مد غالب $HE_{۱۱}$ برای ثابت‌های دی‌الکتریک متفاوت.	۱۴
۷-۱	توزیع میدان برای مدهای $LP$ : (الف) $LP_{۰۱}$ ، (ب) $LP_{۱۱}$ ، (ج) $LP_{۲۲}$ و (د) $LP_{۵۲}$ .	۱۵
۸-۱	نمودارهای ثابت انتشار $\beta/k$ به صورت تابعی از $V$ .	۱۵
۹-۱	نمودارهای ثابت انتشار $b$ برحسب تابعی از $V$ برای مدهای قطبیده خطی مختلف.	۱۶
۱۰-۱	شار کسری توان در غلاف تار ضریب پله‌ای به صورت تابعی از $V$	۱۸
۱۱-۱	طیف تضعیف جذب محیط در شیشه.	۱۹
۱۲-۱	طیف تضعیف در تارهای شیشه‌ای.	۲۰
۱۳-۱	صفحات با فاز ثابت موجبر خمیده	۲۱
۱۴-۱	پهن‌شدگی تپ نوری در تارهای ضریب پله‌ای ناشی از پاشیدگی میان مدی	۲۳
۱-۲	تابش نور تحت زاویه‌ی بازتاب کلی در تار نوری و ایجاد موج محوشونده	۲۹
۲-۲	انتشار پرتو در گمانه‌ی U شکل حسگر تاری	۳۵
۳-۲	انتشار پرتو در گمانه‌ی باریک‌شده حسگر تاری	۳۷
۴-۲	مکان تپ نوری درون تار در زمان $t$	۴۲
۵-۲	طرح کلی سامانه‌ی EDFA با OTDR	۴۷
۶-۲	طرح کلی سامانه‌ی OTDR هم‌دوس	۴۸
۱-۳	نمودار تغییرات طول موج لیزر برحسب دما	۵۹
۲-۳	نمودار تغییرات توان لیزر برحسب جریان	۶۰

۶۰	منبع تغذیه لیزر دیود	۳-۳
۶۱	نگه‌دارنده‌ی لیزر دیود	۴-۳
۶۲	نمودار تغییرات طول موج لیزر پمپ $Nd:YAG$ برحسب دما	۵-۳
۶۳	نمودار تغییرات طول موج لیزر پمپ $Nd:YAG$ برحسب جریان	۶-۳
۶۳	برپایی لیزر $Nd:YAG$	۷-۳
۶۴	موازی ساز و کانونی‌کننده پرتو	۸-۳
۶۶	چیدمان اندازه‌گیری طیف تضعیف تار به روش $Cut - Back$	۹-۳
۶۶	طیف تضعیف تار نوری شیشه‌ای اندازه‌گیری شده به روش $Cut - Back$	۱۰-۳
۶۷	طیف تضعیف تار نوری $PCS$	۱۱-۳
۶۹	تغییرات ضریب شکست سیلیکای خالص نسبت به طول موج	۱۲-۳
۶۹	تغییرات $d^2 n_1 / d\lambda^2$ سیلیکای خالص نسبت به طول موج	۱۳-۳
۷۱	اتصال دهنده‌ی تار با اعمال قوس الکتریکی	۱۴-۳
۷۲	سلول نگاه‌دارنده‌ی نمونه شیمیایی	۱۵-۳
۷۳	نمودار پاسخ طیفی آشکارساز	۱۶-۳
۷۴	نمودار نسبت ولتاژ به توان خروجی آشکارساز	۱۷-۳
۷۵	چیدمان بازتاب سنج نوری در حوزه‌ی زمان	۱۸-۳
۷۷	مقایسه‌ی رفتار آشکارساز در دو وضعیت پهنای باند $17\text{ MHz}$ و $2/1\text{ MHz}$	۱-۴
۷۸	اثر افزایش تپ لیزری بر بازه‌ی پویایی در پهنای باند $17\text{ MHz}$	۲-۴
۷۸	اثر افزایش تپ لیزری بر بازه‌ی پویایی در پهنای باند $2/1\text{ MHz}$	۳-۴
۷۹	تغییرات شدت برحسب پهنای تپ	۴-۴
۸۰	پهنای تپ اندازه‌گیری شده	۵-۴
۸۰	پهن شدن تپ ناشی از انتشار در تار	۶-۴
۸۲	سیگنال افت پله‌ای ناشی از تأثیر مواد برحسب زمان	۷-۴
۸۳	سیگنال افت پله‌ای ناشی از تأثیر مواد برحسب مکان	۸-۴
۸۴	افت پله‌ای سیگنال آشکار شده در فاصله‌ی $1350$ متری	۹-۴
۸۵	افت پله‌ای سیگنال ناشی از تأثیر مواد برحسب مکان برای تپ $500\text{ ns}$	۱۰-۴
۸۶	سیگنال مرجع پس از جوش دادن تار	۱۱-۴
۸۶	سیگنال‌های افت پله‌ای ناشی از مواد هیدروکربنی با ضرایب شکست مختلف	۱۲-۴
۸۷	طیف جذبی مواد هیدروکربنی خالص	۱۳-۴
۸۸	نمودار میزان افت پله‌ای برحسب نسبت $n/E$ مواد هیدروکربنی	۱۴-۴

- ۱۵-۴ سیگنال بازتاب از سطح مشترک هسته و هیدروکربن‌های با نسبت n/E بالا . . . . ۸۹
- ۱۶-۴ سیگنال‌های افت پله‌ای ناشی از مواد هیدروکربنی با تپ لیزری ۵۰۰ns . . . . ۹۰
- ۱۷-۴ سیگنال تشخیص دی کلرومتان در آب . . . . . ۹۱
- ۱۸-۴ سیگنال تشخیص تولوئن در آب . . . . . ۹۱
- ۱۹-۴ سیگنال‌های افت پله‌ای ناشی از تغییرات غلظت تولوئن . . . . . ۹۲
- ۲۰-۴ نمودار میزان افت پله‌ای نسبت به غلظت . . . . . ۹۳
- ۲۱-۴ سیگنال‌های حاصل از تغییر طول تماس تار با نمونه . . . . . ۹۴
- ۲۲-۴ نمودار میزان افت نسبت به تغییر طول برهم کنش تری کلرومتان خالص با تار . . ۹۴

## فهرست جدول‌ها

۴۶	شاخص‌های اصلی آشکارسازهای APD سیلیکونی، ژرمانیومی و InGaAs ..	۱-۲
۵۹	مشخصات لیزر دیود .....	۱-۳
۶۷	مشخصات تار نوری .....	۲-۳
۷۳	مشخصات آشکارساز .....	۳-۳
۸۲	مشخصات نمونه‌های شیمیایی هیدروکربنی .....	۱-۴



## پیشگفتار

حسگرهای تار نوری امروزه به خاطر ویژگی‌ها و مزایای آن‌ها نظیر کوچکی، انعطاف پذیری، کنترل از راه دور، عدم حساسیت به اختلالات الکتریکی و مغناطیسی و پایداری شیمیایی نسبت به حسگرهای متداول از اهمیت ویژه‌ای برخوردارند و تحقیقات بسیاری در این زمینه صورت می‌گیرد. حسگرهای تار نوری براساس نقش تار در حسگر به دو دسته‌ی بیرونی و درونی تقسیم می‌شوند. در حسگرهای بیرونی تار تنها نقش انتقال دهنده‌ی پرتو به محیط مورد ارزیابی را دارد. ولی در حسگرهای درونی بخشی از تار، یا کل آن، به عنوان محیط حسگر رفتار می‌کند. اساس عملکرد این حسگرها بررسی میزان تأثیر نمونه بر میدان محوشونده درون غلاف تار است.

شاخص‌های اصلی تار از قبیل زاویه‌ی پذیرش یا گشودگی عددی تار، تضعیف و ... در طراحی حسگرها نقش به‌سزایی دارند. بنابراین در فصل اول به توصیف ویژگی‌ها و شاخص‌های اصلی تار و رفتار تار به عنوان یک موجبر دی الکتریک استوانه‌ای پرداخته‌ایم.

در فصل دوم شرح مختصری در مورد انواع حسگرهای شیمیایی درونی میدان محوشونده آورده شده است. عوامل مختلفی از قبیل جذب، پراکندگی، تغییرات ضریب شکست بر میدان محوشونده تأثیر می‌گذارند. در صورتی که مولفه‌ی مورد اندازه‌گیری در طول موج به کار برده شده دارای جذب باشد می‌توان براساس بیناب‌نمایی جذبی حسگرهای تک نقطه به منظور آشکارسازی تأثیرات نمونه بر میدان محوشونده طراحی نمود. در نتیجه مولفه‌ی مورد نظر را در یک نقطه از تار اندازه‌گیری کرد.

جهت ردیابی و آشکارسازی مولفه‌های مورد نظر در کل طول تار یا در چندین نقطه از تار سامانه‌ی بازتاب سنج نوری در حوزه‌ی زمان به کار برده می‌شود. بنابراین به این حسگرها که مبتنی بر پراکندگی موج محوشونده هستند حسگرهای توزیع شده گفته می‌شود.

برخی از نمونه‌های شیمیایی طیف جذبی مناسبی برای بررسی به روش معمول بیناب‌نمایی ندارند و نوارهای جذبی آن‌ها ضعیف است. بنابراین باید از معرف شیمیایی استفاده نمود تا نمونه باعث تغییر خواص جذبی معرف و در نتیجه آشکارسازی مولفه‌ی شیمیایی شود.

پس از بررسی انواع حسگرهای شیمیایی، به برپایی حسگر شیمیایی شبه توزیع شده بر مبنای بازتاب سنج نوری پرداختیم. در فصل سوم ویژگی‌ها و مشخصات قطعات و دستگاه‌های مورد نیاز در این برپایی شرح داده شده است.

در نهایت در بخش چهارم این پایان نامه نتایج حاصل از برپایی حسگر شیمیایی شبه توزیع شده مبتنی بر بازتاب سنج نوری به منظور آشکارسازی و ردیابی مواد هیدروکربنی خالص و بررسی اثرات ناشی از تغییر ضریب شکست و غلظت مواد مورد تجزیه و تحلیل قرار گرفته است.

## فصل ۱

# نقش تارهای نوری در حسگرهای شیمیایی

### ۱-۱ مقدمه

تارهای نوری در واقع موجبرهای نوری با ساختاری شامل یک هسته‌ی مرکزی دی‌الکتریک و غلافی دی‌الکتریک با ضریب شکست کمتر از ضریب شکست هسته هستند، که براساس بازتاب‌های کلی داخلی مکرر در سطح مشترک هسته-غلاف پرتو نوری را از مکانی به مکان دیگر هدایت می‌کنند. پدیده‌ی هدایت پرتو توسط بازتاب‌های کلی داخلی مکرر به وسیله‌ی جان تایدل<sup>۱</sup> در اوایل دهه‌ی ۱۸۵۴ نشان داده شد. او نشان داد که پرتو نور در مسیر خمیده‌ی جریان آب از یک ظرف، منتشر می‌شود. با این حال، اپتیک مربوط به تار نوری در دهه‌ی ۱۹۵۰ توسط تلاش‌های هاپکینز و کاپانی<sup>۲</sup> در انگلستان و وان هیل<sup>۳</sup> در هلند گسترش یافت که منجر به کاربرد تار نوری در بسیاری از دستگاه‌های اپتیکی شد.

تارهای نوری براساس توزیع عرضی ضریب شکست به دو دسته تارهای با ضریب پله‌ای<sup>۴</sup> و تارهای با ضریب متغیر<sup>۵</sup> تقسیم می‌شوند. در تارهای با ضریب پله‌ای، ضریب شکست هسته و غلاف ثابت

<sup>1</sup>John Tyndell

<sup>2</sup>Hopkins and Kapany

<sup>3</sup>Van Heel

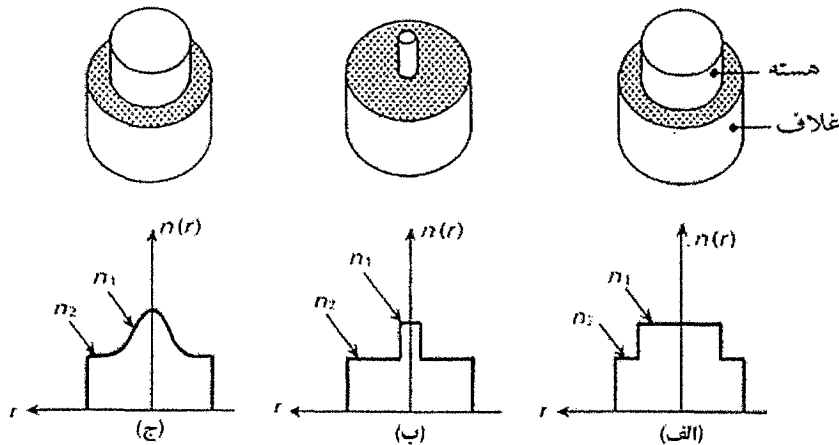
<sup>4</sup>step index fibers

<sup>5</sup>graded index fibers

است که به خاطر تغییر ضریب شکست در سطح مشترک هسته - غلاف به صورت پله‌ای و ثابت به آنها تارهای با ضریب پله‌ای می‌گویند. توزیع ضریب شکست این تارها عبارت است از:

$$n(r) = \begin{cases} n_1 & r < a \\ n_2 & r \geq a \end{cases} \quad (1-1)$$

$a$  و  $r$  به ترتیب مختصه شعاعی و شعاع هسته را نشان می‌دهند. تارهای ضریب پله‌ای به دو دسته تک مد و چند مد تقسیم می‌شوند. قطر هسته‌ی تارهای چند مد حدود  $50 \mu m$  و یا بیشتر (شکل ۱-۱) و قطر هسته‌ی تارهای تک مد که تنها یک مد الکترومغناطیسی عرضی قطبیده خطی در آنها انتشار می‌یابد، از مرتبه‌ی ۲ تا  $10 \mu m$  است. از دیدگاه نظری، اگر یک تار تک مد معمولی بدون ناخالصی و ایده آل با تقارن دایره‌ای و کاملاً مستقیم داشته باشیم نور قطبیده خطی در کل تار وضعیت خود را حفظ می‌کند ولی در عمل چنین وضعیتی ایده آلی امکان پذیر نیست. عیوب ذاتی از قبیل خمش، تنش و تغییرات دما باعث ایجاد ناهمگنی سمتی در تار می‌شود. نور قطبیده خطی به دو مولفه‌ی عمود برهم با سرعت‌های فاز متفاوت تجزیه می‌شود. در نتیجه جفت شدگی بین دو مولفه‌ی عمود و تغییرات تصادفی فاز نسبی موجب تغییر وضعیت قطبش در طول تار می‌شود که قابل پیش‌بینی نیست. در تارهای چندمد تعداد متناهی مد انتشار می‌یابد که این تعداد وابسته به پارامترهای فیزیکی تار (اختلاف ضریب شکست نسبی و شعاع هسته) و طول موج نور منتقل شده در تار است.

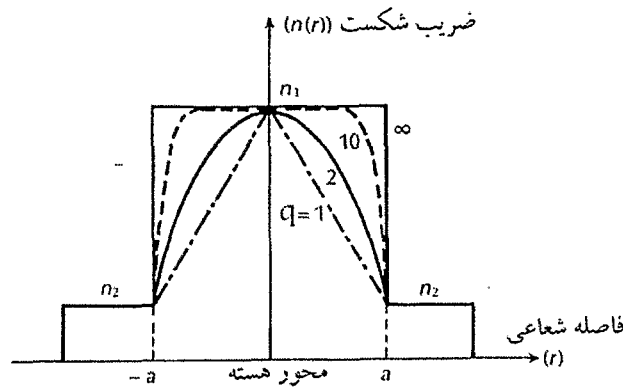


شکل ۱-۱: انواع تارهای نوری (الف) چندمد ضریب پله‌ای، (ب) تک مد ضریب پله‌ای و (ج) چندمد ضریب متغیر

در تارهای ضریب متغیر (شکل ۱-۱)، ضریب شکست هسته‌ی تار از یک مقدار بیشینه  $n_1$  در مرکز هسته به صورت شعاعی به سمت غلاف تار کاهش می‌یابد.

$$n(r) = \begin{cases} n_1 [(1 - 2\Delta)(r/a)^q]^k & r < a \\ n_1 (1 - 2\Delta)^k = n_2 & r \geq a \end{cases} \quad (2-1)$$

$\Delta$  ضریب شکست نسبی و  $q$  شاخص نمایه است.  $q = \infty$  نشان دهنده ی تار ضریب پله ای،  $q = 2$  نمایه ی سهموی و  $q = 1$  نمایه مثلثی است (شکل ۱-۲).



شکل ۱-۲: نمایه ضریب شکست تار برای مقادیر مختلف  $q$ .

پرتوهای محوری مسیرهای انحنادار (به فرم سینوسی) را در تار طی می کنند. با در نظر گرفتن اپتیک هندسی برای تار با نمایه ی تقریباً سهموی، پرتوهایی که نزدیک به محور تار انتشار می یابند مسیرهای کوتاه تری نسبت به پرتوهای نزدیک به غلاف طی می کنند. البته پرتو نزدیک به محور در ناحیه ی با ضریب شکست بیشتر قرار دارد بنابراین سرعت آن نسبت به پرتو نزدیک به غلاف کمتر است در نتیجه پرتوها دارای زمان گذار تقریباً یکسان تا انتهای تار هستند.

با توجه به این که در این پایان نامه جهت برپایی حسگر شیمیایی از تار استوانه ای با مقطع دایره ای چند مد ضریب پله ای استفاده شده است، در این فصل به توصیف ویژگی های این گونه تارها می پردازیم.

## ۱-۲ گشودگی عددی تار

با در نظر گرفتن انتشار نور در تار نوری بر اساس بازتاب کلی داخلی در سطح هسته-غلاف، چون تنها پرتوهای با زاویه ی بزرگتر از زاویه ی بحرانی نسبت به خط عمود بر سطح مرزی توسط بازتاب کلی داخلی می توانند انتقال یابند، واضح است که تمامی پرتوهای تابیده شده بر وجه فرودی تار نمی توانند در طول تار انتشار یابند.

با توجه به آن که دو دسته پرتوی محوری<sup>۶</sup> و پیمپچی<sup>۷</sup> در تار انتشار می یابند، می توان شرایط انتشار پرتوها در تار را تعیین نمود. اگر برای پرتوهای محوری یعنی پرتوهایی که در صفحه ی عبور یافته از محور تار انتشار می یابند، شکل زیر را در نظر بگیریم:

<sup>۶</sup>meridional rays

<sup>۷</sup>skew rays