

دانشکده علوم پایه

گروه فیزیک

گرایش فوتونیک

شبیه سازی انتشار پالسهای سالیتون در فیبر نوری با استفاده از روش

**FDTD**

از:

**الهام بروغنی**

استاد راهنما:

**دکتر حمیدرضا مشایخی**

اسفند ۹۰

درود بر هم او که آفرید ، آفرید چونان شمایی را

شمایی که زشتی‌ها و درشتی‌هایم را

گویی هیچگاه ندیدید و

ندانسته مهر ورزیدید و باز هم مهر،

هماره تکیه‌گام بودید و پلکانم برای صعود و اگر نبودید...

تقدیم به بهترین‌هایم

پدر دلسوز، مادر مهربان

و همسر عزیزم

## سپاس و قدردانی

پروردگارا، سپاس و ستایش حقیقی تو راست که با قلم قدرت خویش، جامعه بشریت را به زیور علم و دانش آراستی و انسانیت را در زیر لوای آن، تعالی بخشیدی.

در تهیه و تنظیم این پایان‌نامه، با همه کوششی که به کار رفته است کار خود را بی‌عیب و نقص نمی‌دانم و آرزومندم همین مختصر در پیشگاه اهل تحقیق مقبول افتد. سپاسگزار استاد راهنمای بزرگوaram جناب آقای دکتر مشایخی هستم که بی‌شک بدون هدایت و حمایت ایشان انجام این پایان‌نامه غیرممکن بود. کمال تشکر از اساتید داور آقایان دکتر روضاتی و دکتر رجایی که علاوه بر اینکه افتخار شاگردی ایشان را در طول دوران تحصیلم داشته‌ام، پایان‌نامه مرا با نظر عنایت نگرستند را دارم. صمیمانه‌ترین سپاس‌ها را به عزیزانم فاطمه بصیری، طاهره نعمتی آرام، فاطمه میلاد، آسیه میرزایی، طاهره لطفی، منیره پریور و دیگر دوستان عزیزمی که در این دوره افتخار آشنایی‌شان را داشتم تقدیم می‌کنم. با تمام وجود بهروزی، سربلندی و شادمانی این عزیزانم را از درگاه پروردگار خواستارم و یادو خاطره‌شان همواره در ذهن من باقی خواهد ماند.

شبیه سازی انتشار سالیتونها در فیبر نوری با استفاده از روش FDTD

الهام بروغنی

کلمه سالیتون به نوع خاصی از بسته های موج که می توانند در مسافت های طولانی بدون تغییر شکل انتشار یابند، اتلاق می شوند. در حالت کاربردی، سالیتون ها هنگامی که داخل فیبر انتشار می یابند، می توانند با انواع زیادی از اختلال روبرو شوند، اختلال شامل اتلاف فیبر، نویز تقویت کننده، پاشندگی درجه سوم، پراکنندگی رامان درون- پالسی می شود. برای پالس های مافوق کوتاه که فقط شامل چند دوره می شوند، لازم است که مفهوم پوش پالس کنار گذاشته شود و معادلات ماکسول به طور مستقیم با استفاده از الگوریتم روش تفاضل محدود حوزه- زمان (FDTD) حل شود. در این پایان نامه دو روش از FDTD و SSFM برای بررسی انتشار سالیتون استفاده می کنیم. اثرات غیرخطی و پاشندگی مرتبه بالاتر را بر سالیتون های مرتبه یک (پایه)، دو و سه برای عرض پالس های مختلف در مرتبه ی پیکوثانیه و فمتوثانیه مورد بررسی قرار می دهیم. این اثرات را به صورت تنها و در حضور دیگر اثرات غیرخطی مراتب بالا مورد بررسی قرار می- دهیم. به طور کلی اثرات غیرخطی و پاشندگی مرتبه بالاتر بعد از چند دوره سالیتونی منجر به شکافت سالیتون ها می شوند که کارایی سیستم های ارتباطی نوری را محدود میکند. در انتها کمینه سازی اثر SS بر انتشار سالیتون های مرتبه دو از طریق پیش چیرپ انجام شده است.

کلیدواژه: روش تفاضل محدود حوزه-زمان، مراتب بالا، سالیتون، فمتوثانیه

عنوان	صفحه
چکیده فارسی	خ
چکیده انگلیسی	د
فصل اول: مقدمه	۱
چشم‌انداز تاریخی	۲
<b>فصل دوم: سالیتون‌های نوری</b>	۶
۱-۲ مشخصات فیبر	۷
۲-۲ اتلاف فیبر	۸
۱-۲-۲ ضریب تضعیف	۹
۲-۲-۲ جذب مادی	۱۱
۳-۲-۲ پراکندگی رالی	۱۱
۳-۲ معادله شرودینگر غیر خطی	۱۳
۱-۳-۲ محیط‌های غیرخطی	۱۳
۲-۳-۲ مدولاسیون خود بخودی فاز (SPM)	۱۴
۳-۳-۲ مدولاسیون متقابل فاز (CPM)	۱۵
۴-۳-۲ ترکیب چهار-موج (FWM)	۱۶
۴-۲ معادله شرودینگر غیر خطی انتشار در محیط غیر خطی	۱۳
۵-۲ اثرات غیر خطی مراتب بالا	۱۸
۶-۲ مدولاسیون خود بخود فاز القا شده	۲۲
۱-۶-۲ تغییرات طیفی SPM - القا شده	۲۲
۲-۶-۲ شیفت فاز غیر خطی	۲۲
۳-۶-۲ تغییرات در طیف پالس	۲۳
۷-۲ سالیتون‌های نوری	۲۷
۱-۷-۲ سالیتون‌های فیبری	۲۷
۲-۷-۲ سالیتون‌های روشن	۲۹
۸-۲ چرپ فرکانسی	۳۱
۹-۲ اثرات مرتبه-بالا تر	۳۳
۱۰-۲ معادلات لحظه‌ای برای پارامترهای پالس	۳۴
۱-۱۰-۲ پاشندگی مرتبه سوم	۳۶
۲-۱۰-۲ خود-سرازیری	۳۸
۳-۱۰-۲ پراکندگی رامان داخل-پالسی	۴۲
۱۱-۲ انتشار پالس‌های فمتو ثانیه‌ای	۴۷
۱۲-۲ اثر ترکیبی TOD و خود سرازیری و پراکندگی رامان داخل پالس	۴۹
<b>فصل سوم: حل عددی معادله شرودینگر</b>	۵۱
۱-۳ حل عددی معادله شرودینگر	۵۲
۱-۱-۳ روش FDTD	۵۴

۵۱	..... روش تقسیم گام فوریه
۶۵	..... فصل چهارم: شبیه سازی سالیتون ها
۶۶	..... ۱-۲۴ روش FDTD
۶۶	..... ۱-۱-۴ کاهش معادلات ماکسول به یک بعد
۶۷	..... ۲-۱-۴ معادلات پیشرفت زمان یک بعدی
۷۱	..... ۳-۱-۴ انتشار پالس سالیتون با روش FDTD
۷۳	..... ۲-۴ شبیه سازی انتشار سالیتون با استفاده از نرم افزار FullWAVE FDTD
۷۳	..... ۱-۲-۴ اجرای قسمت غیر خطی
۷۳	..... ۲-۲-۴ محیط خطی
۷۴	..... ۳-۲-۴ محیط غیر خطی
۷۶	..... ۳-۴ اثر شکل پالس و چرپ ابتدائی
۷۷	..... ۱-۳-۴ اثر چرپ بر طیف SPM - پهن شده
۷۷	..... ۲-۳-۴ بیشترین باریک شدگی طیفی
۸۰	..... ۴-۴ تعادل بین SPM و GVD
۸۳	..... ۵-۴ انتشار سالیتون ها
۸۶	..... ۶-۴ انتشار سالیتون ها در حضور اتلاف
۹۰	..... ۱-۶-۴ انتشار سالیتون در حضور اتلاف و پاشندگی مرتبه سوم
۹۳	..... ۷-۴ تاثیر پاشندگی مرتبه ۳ بر سالیتون های مراتب بالا
۹۶	..... ۸-۴ انتشار پالس های فمتو ثانیه ای
۹۶	..... ۱-۸-۴ انتشار سالیتون مرتبه دوم 50fs
۱۰۱	..... ۲-۸-۴ انتشار سالیتون مرتبه دوم 10fs
۱۰۷	..... ۹-۴ کمینه کردن اثر خودتیزی با استفاده از چرپ اولیه
۱۰۸	..... ۱-۹-۴ حالت ۱ ( $N=1$ ) سالیتون مرتبه اول - بدون چرپ اولیه
۱۰۹	..... ۲-۹-۴ حالت ۲ ( $N=2$ ) پالس های سالیتون مرتبه دوم بدون چرپ اولیه
۱۱۰	..... ۳-۹-۴ حالت ۳ ( $N=2$ ) پالس های سالیتون مرتبه ی دوم با چرپ اولیه
۱۱۵	..... ۱۰-۴ اثر پراکندگی رامان بر سالیتون مرتبه یک
۱۱۵	..... ۱-۱۰-۴ حوزه زمان
۱۱۸	..... ۲-۱۰-۴ حوزه فرکانس
۱۲۱	..... فصل پنجم: نتیجه گیری و پیشنهاد برای ادامه کار
۱۲۲	..... ۱-۵ نتیجه گیری
۱۲۴	..... ۲-۵ پیشنهاد برای ادامه کار
۱۲۵	..... منابع

## فهرست شکل‌ها

- شکل ۱-۲: تصویر شماتیک سطح مقطع و پروفایل ضریب شکست یک فیبر ضریب شکست پله‌ای ..... ۷
- شکل ۲-۲: طیف اتلاف برای فیبر تک‌مد تولید شده در ۱۹۷۹ وابستگی طول موجی چندین مکانیزم پایه‌ای اتلاف ..... ۱۰
- شکل ۳-۲: تغییرات زمانی SPM-الفا شده (a) شیفت فاز  $\phi_{NL}$  و (b) چرپ فرکانسی  $\omega\delta$  برای پالس‌های گاوسی (منحنی خط-تیره) و سوپر گاوسی (منحنی توپر) ..... ۲۴
- شکل ۴-۲: پهن شدگی طیفی برای یک پالس چرپ نشده گاوسی. طیف با شیفت فاز ماکزیم  $\phi_{max}$  برچسب زده شده که به طور خطی با قله توان مربوط است [۴۱] ..... ۲۵
- شکل ۵-۲: طیف تجربی مشاهده شده برای پالس گاوسی در خروجی یک فیبر ۹۹m. طیف با شیفت فاز ماکزیم  $\phi_{max}$  برچسب زده شده که به طور خطی با قله توان مربوط است [۴۱] ..... ۲۶
- شکل ۶-۲: پیشروی سالیتون‌های مرتبه اول (ستون چپ) و مرتبه سوم (ستون راست) بر یک دوره‌ی سالیتونی. ردیف‌های بالا و پایین شکل پالس و پروفایل چرپ آن را به ترتیب نشان می‌دهند ..... ۳۱
- شکل ۷-۲: پیشروی یک پالس نوری چرپ شده برای مورد  $N=1$  و  $C=0.5$  ..... ۳۲
- شکل ۸-۲: (a) پیشروی زمانی (b) پیشروی طیفی یک پالس "sech" در طول موج پاشندگی صفر با قله توانی که  $\tilde{N} = 2$  باشد ..... ۳۷
- شکل ۹-۲: شکل‌های پالس در  $Z/L_D$  برابر با ۵ و ۱۰ برای یک سالیتون پایه در حضور خودسرازیری. منحنی نقطه‌چین شکل پالس اولیه در  $Z=0$  را برای مقایسه نشان می‌دهد. هنگامی که  $s=0$  منحنی خط چین و توپر بر منحنی خط چین منطبقند ..... ۴۰
- شکل ۱۰-۲: (a) تحول زمانی و (b) تحول طیفی یک سالیتون مرتبه ۲ ( $N=2$ ) روی ۵ طول پاشندگی ..... ۴۱
- شکل ۱۱-۲: (a) تحول فرکانسی رامان-الفا شده (b) عرض پالس وقتی یک سالیتون پایه با  $T_0 = 5 \cdot fs$  در یک فیبر به طول ۱۰m انتشار یابد. پارامتر چرپ ورودی در محدوده ۰ تا  $0.2$  تغییر می‌کند. ..... ۴۴
- شکل ۱۲-۲: (a) زمانی (b) طیفی یک سالیتون مرتبه دو ( $N=2$ ) وقتی  $\tau_R = 0.01$ ، شکافت سالیتون القا شده به وسیله پراکندگی رامان داخل پالس مشاهده می‌شود. ..... ۴۶
- شکل ۱۳-۲: (a) پیشروی (b) طیفی وقتی یک سالیتون مرتبه دو ( $N=2$ ) عرض  $5 \cdot fs$  (FWHM) با  $D=16ps/(km-nm)$ ، پارامترهای مراتب بالا مقادیر  $S=0.05$ ،  $\tau_R = 0.1$ ،  $\delta_3 = 0.03$  ..... ۸۴
- شکل ۱-۳: سلول واحد یی ..... ۵۶
- شکل ۲-۳: فلوچارت تحلیل FDTD ..... ۵۷
- شکل ۳-۳: SSFM برای یک تکرار از گام h که در  $z = (j-1)$  آغاز شده است. پالس اولیه  $A(0, t)$  وارد محیط شده است. طول فیبر به گام‌های  $j_m = L/H$  به طول h شکسته شده است ..... ۶۲
- شکل ۴-۳: فلوچارت روش SSF ..... ۶۴
- شکل ۱-۴: چارت ۱ بعدی فضا-زمان الگوریتم یی که تفاضلات مرکزی را برای مشتقات مکانی و جهش قورباغه‌ای بر مشتقات زمانی k، شماره‌های نمو میدان الکتریکی و n گام زمانی را نشان می‌دهد ..... ۶۷
- شکل ۲-۴: انتشار پالس گاوسی مدوله شده با استفاده از موج سینوسی با استفاده از روش FDTD ..... ۶۹
- شکل ۳-۴: انتشار پالس گاوسی مدوله شده (منحنی توپر) به همراه پوش پالس گاوسی (منحنی نقطه چین) با استفاده از روش FDTD ..... ۷۰
- شکل ۴-۴: انتشار پالس به شکل سکانت با استفاده از روش FDTD ..... ۷۲



- شکل ۴-۵: پاسخ زمانی موجبر خطی. دقت شود عرض پالس حین انتشار تغییر می کند ..... ۷۴
- شکل ۴-۶: پاسخ زمانی موجبر غیر خطی. دقت شود عرض پالس در حین انتشار تغییری نمی کند. .... ۷۵
- شکل ۴-۷: تحول طیف‌های پالس برای پالس‌های گاوسی ( $m=1$ ) (شکل بالا) و سوپر گاوسی ( $m=3$ ) (شکل پایین) در طول  $10L_{NL}$  بدون چرپ ..... ۷۶
- شکل ۴-۸: طیف‌های یک پالس گاوسی را برای چرپ‌های مثبت و منفی با استفاده از  $\phi_{max} = 4.5\pi$  نشان می‌دهد ..... ۷۸
- شکل ۴-۹: باریک شدگی طیفی SPM - القا شده برای  $C = -2\phi_{max}$  را نشان می‌دهد. که بیشترین باریک شدگی طیفی است. .... ۷۹
- شکل ۴-۱۱: پروفایل ورودی و خروجی پالس به شکل sech که در معرض غیر خطی بودن کر در یک محیط پاشنده با GVD مثبت قرار گرفته است ..... ۸۱
- شکل ۴-۱۲: تغییرات زمانی یک پالس به شکل sech که در معرض غیر خطی بودن کر در یک محیط پاشنده با GVD منفی قرار گرفته است. پاشندگی منجر به پهن شدگی پالس و اثر غیر خطی کر منجر به فشردن پالس می‌شود. در نتیجه یک سالیتون نوری تشکیل می‌شود ..... ۸۲
- شکل ۴-۱۳: پروفایل ورودی و خروجی پالس به شکل sech که در معرض GVD منفی قرار گرفته است ..... ۸۳
- شکل ۴-۱۴: انتشار سالیتون پایه در فیبر بدون اتلاف در مسافت یک دوره‌ی سالیتونی ..... ۸۴
- شکل ۴-۱۵: انتشار سالیتون مرتبه دو در فیبر بدون اتلاف در مسافت یک دوره‌ی سالیتونی ..... ۸۴
- شکل ۳-۸: طیف هماهنگ‌های به دست آمده از یون هلیم در معرض تابش میدان لیزری دورنگی بدون چرپ بیان شده با رابطه‌ی (۳-۲۷). .... ۸۵
- شکل ۴-۱۶: انتشار سالیتون مرتبه سه در فیبر بدون اتلاف در طول یک دوره‌ی سالیتونی ..... ۸۵
- شکل ۴-۱۷: انتشار سالیتون مرتبه دو در فیبر بدون اتلاف در طول پنج دوره‌ی سالیتونی ..... ۸۶
- شکل ۴-۱۸: انتشار سالیتون پایه با  $t_{FWHM} = 1.76t_0 = 10 \text{ ps}$  و  $\alpha = 0.2 \frac{dB}{Km}$  و  $\beta_2 = -20 \frac{ps^2}{Km}$  مسافت ۱۰ دوره سالیتون. .... ۸۷
- شکل ۴-۱۹: انتشار سالیتون پایه با  $t_{FWHM} = 1.76t_0 = 10 \text{ ps}$  و  $\alpha = 0.2 \frac{dB}{Km}$  و  $\beta_2 = -2 \frac{ps^2}{Km}$  مسافت دو دوره سالیتونی. .... ۸۹
- شکل ۴-۲۰: انتشار سالیتون پایه با  $t_{FWHM} = 1.76t_0 = 10 \text{ ps}$  و  $\alpha = 0.2 \frac{dB}{Km}$  و  $\beta_2 = -2 \frac{ps^2}{Km}$  و  $\beta_3 = 0.1 \frac{ps^3}{Km}$  نشان می‌دهد. .... ۹۰
- شکل ۴-۲۱: انتشار سالیتون پایه با  $t_0 = 0.01 \text{ ps}$  و  $\alpha = 0.2 \frac{dB}{Km}$  و  $\beta_2 = -2 \frac{ps^2}{Km}$  و  $\beta_3 = 0.1 \frac{ps^3}{Km}$  ..... ۹۱
- شکل ۴-۲۲: انتشار سالیتون پایه با  $t_0 = 1 \text{ ps}$  و  $\alpha = 0.2 \frac{dB}{Km}$  و  $\beta_2 = 0$  و  $\beta_3 = 0.1 \frac{ps^3}{Km}$  ..... ۹۲
- شکل ۴-۲۳: انتشار سالیتون مرتبه ۲ با  $t_0 = 1 \text{ ps}$  و  $\beta_2 = -1.5 \frac{ps^2}{Km}$  و  $\beta_3 = 0.1 \frac{ps^3}{Km}$  در مسافت یک دوره سالیتونی ..... ۹۳
- شکل ۴-۲۴: انتشار سالیتون مرتبه دو با  $t_0 = 10 \text{ fs}$  و  $\beta_2 = 1.5 \frac{ps^2}{Km}$  و  $\beta_3 = 0.1 \frac{ps^3}{Km}$  در مسافت یک دوره سالیتونی ..... ۹۴
- شکل ۴-۲۵: انتشار سالیتون مرتبه دو با  $t_0 = 10 \text{ fs}$  و  $\beta_2 = 1.5 \frac{ps^2}{Km}$  و  $\beta_3 = 0.1 \frac{ps^3}{Km}$  ..... ۹۵
- شکل ۴-۲۶: تحول پالس فقط با در نظر گرفتن اثر پاشندگی مرتبه سه  $t_0 = 50 \text{ fs}$  ..... ۹۷
- شکل ۴-۲۷: تحول پالس فقط با در نظر گرفتن اثر پاسخ تأخیری رامان  $t_0 = 50 \text{ fs}$  ..... ۹۷
- شکل ۴-۲۸: تحول پالس فقط با در نظر گرفتن اثر خود تیزی  $t_0 = 50 \text{ fs}$  ..... ۹۹
- شکل ۴-۲۹: تحول پالس وقتی که هر سه اثر مراتب بالا در نظر گرفته شوند  $t_0 = 50 \text{ fs}$  ..... ۱۰۰

- شکل ۳۰-۴: تحول توان شکل های پالس فقط با در نظر گرفتن اثر پاشندگی مرتبه سوم  $t_0 = 10fs$  ..... ۱۰۲
- شکل ۳۱-۴: شکل پالس وقتی که فقط پاسخ تأخیری رامن در نظر گرفته شود  $t_0 = 10fs$  ..... ۱۰۴
- شکل ۳۲-۴: شکل پالس وقتی که فقط اثر خود تیزی در نظر گرفته شود  $t_0 = 10fs$  ..... ۱۰۵
- شکل ۳۳-۴: شکل پالس وقتی که هر سه اثر غیر خطی مراتب بالا در نظر گرفته شود  $t_0 = 10fs$  ..... ۱۰۶
- شکل ۳۴-۴: پالس سالیتون مرتبه یک شامل اثر SS ..... ۱۰۸
- شکل ۳۵-۴: پالس سالیتون مرتبه دو شامل اثر SS ..... ۱۰۹
- شکل ۳۶-۴: کم کردن اثر SS با استفاده از چرپ مثبت در سالیتون مرتبه دو ..... ۱۱۲
- شکل ۳۷-۴: کم کردن اثر SS با استفاده از چرپ منفی در سالیتون مرتبه دو ..... ۱۱۴
- شکل ۳۸-۴: انتشار پالس سالیتون پایه در چهار دوره سالیتونی بدون در نظر گرفتن اثرات SFS و TOD ..... ۱۱۶
- شکل ۳۹-۴: انتشار پالس سالیتون پایه در چهار دوره سالیتونی با در نظر گرفتن اثر SFS ..... ۱۱۶
- شکل ۴۰-۴: انتشار پالس سالیتون پایه در چهار دوره سالیتونی با در نظر گرفتن اثر SFS و TOD ..... ۱۱۷
- شکل ۴۱-۴: انتشار پالس سالیتون پایه در حوزه فرکانس در چهار دوره سالیتونی بدون در نظر گرفتن اثرات SFS و TOD ..... ۱۱۸
- شکل ۴۲-۴: انتشار پالس سالیتون پایه در حوزه فرکانس در چهار دوره سالیتونی با در نظر گرفتن اثر SFS ..... ۱۱۹
- شکل ۴۳-۴: انتشار پالس سالیتون پایه در حوزه فرکانس در چهار دوره سالیتونی با در نظر گرفتن اثر SFS و TOD ..... ۱۱۹

# فصل اول:

مقدمه

## ۱-۱ چشم انداز تاریخی

هدف اصلی سیستم‌های ارتباطی فرستادن اطلاعات با بالاترین سرعت ممکن، پایین‌ترین آمار خطا و کم‌ترین میزان مصرف از منابع می‌باشد. بازتاب داخلی کلی، پدیده اصلی مسئول هدایت نور در فیبرهای نوری، از قرن نوزدهم شناخته شده است. هیچ در کتابش این اثر را به خوبی توضیح داده است [۱].

فیبرهای شیشه ای بدون روکش<sup>۲</sup> در دهه ۱۹۲۰ [۳و۲] ساخته شدند ولی رشته اپتیک فیبر تا دهه ۱۹۵۰، زمانی که استفاده از یک لایه روکش منجر به یک پیشرفت قابل ملاحظه در مشخصات فیبر شد، هنوز به وجود نیامده بود [۴]. رشته نورشناسی فیبر در طی دهه ۱۹۶۰، برای ارسال تصویر از طریق یک دسته فیبر شیشه‌ای، به سرعت گسترش یافت [۵]. این فیبرهای قدیمی نسبت به استاندارد کنونی به شدت پراتلاف ( $1000 \frac{dB}{Km} >$  اتلاف) بودند. این وضعیت در سال ۱۹۷۰ با پیشنهاد کاوو<sup>۳</sup> و همکارانش [۶]، که تلفات فیبرهای سیلیکایی به کمتر از  $20 \frac{dB}{Km}$  کاهش می‌یافت، به شدت تغییر کرد [۷]. پیشرفت بعدی در تکنولوژی ساخت [۸]، ساختن فیبری با اتلاف در حد  $0.2 \frac{dB}{Km}$  در ناحیه طول موج  $1/55 \mu m$  بود که در آن سطح اتلاف به وسیله فرآیند پراکندگی ریلی<sup>۴</sup> محدود شده است [۹]. دسترسی به فیبرهای سیلیکایی کم‌اتلاف نه تنها منجر به یک انقلاب در ارتباطات فیبر نوری شد [۱۰]، بلکه همچنین منجر به پیدایش رشته جدید اپتیک فیبرهای غیرخطی<sup>۵</sup> شد.

---

<sup>1</sup>J.Hecht

<sup>2</sup>Uncladded Glass Fibers

<sup>3</sup> K. C. kao

<sup>4</sup>Reyleigh Scattering

<sup>5</sup> Nonlinear Fiber Optics

فرآیندهای پراکندگی رامان برانگیخته<sup>۱</sup> (SRS) و بریلیون برانگیخته<sup>۲</sup> (SBS) در فیبرهای نوری در همان سالهای ۱۹۷۲ مطالعه شد [۱۱]. این کار مطالعه‌ی پدیده‌های غیرخطی دیگر نظیر شکست مضاعف القا شده نوری<sup>۳</sup>، آمیختگی چهار- موج<sup>۴</sup> (FWM) پارامتری و مدولاسیون خود بخودی فاز<sup>۵</sup> (SPM) را برانگیخت [۱۲].

در سال ۱۹۷۳ پیشنهاد شد که فیبرهای اپتیکی می‌توانند پالس‌های شبه-سالیتون<sup>۶</sup> را حمایت کنند. سالیتون‌های نوری به عنوان نتیجه‌ی اثر متقابل بین اثرات پاشندگی و غیرخطی [۱۳] در آزمایشی در سال ۱۹۷۰ مشاهده شدند [۱۴] و منجر به پیشرفت‌هایی در تولید و کنترل پالس‌های فوق‌کوتاه سالیتون در دهه ۱۹۸۰ شدند. هم‌چنین در دهه ۱۹۸۰ در تکنولوژی-های فشرده سازی پالس<sup>۷</sup> و راه‌گزینی- نوری<sup>۸</sup> که از اثرات غیرخطی در فیبرها ناشی می‌شود، پیشرفت‌هایی حاصل شد [۱۵]. پالس‌هایی به کوتاهی ۶fs در ۱۹۸۷ تولید شد [۱۶].

رشته اپتیک فیبرغیرخطی تا دهه ۱۹۹۰ به رشدش ادامه داد. این رشته وقتی فیبرهای نوری با مولفه‌های کمیاب زمین آلاینده شدند و برای ساختن تقویت‌کننده‌ها<sup>۹</sup> و لیزرها استفاده شدند، پیشرفت چشمگیری کرد. اگرچه تقویت‌کننده‌های فیبری زودتر در ۱۹۶۴ ساخته شدند، اما بعد از ۱۹۸۷ گسترش آنها شتاب یافت [۱۷]. تقویت‌کننده‌های فیبری اریبوم-آلاینده<sup>۱۰</sup> (EDFA) بیشترین توجه را جلب کرد، زیرا در محدوده طول موج نزدیک به  $1/55 \mu\text{m}$  کار می‌کرد و بنابراین

---

<sup>1</sup> Stimulated Raman Scattering

<sup>2</sup> Stimulated Brillouin Scattering

<sup>3</sup> Optically Induced Birefringence

<sup>4</sup> Four- Wave Mixing

<sup>5</sup> Self- Phase Modulation

<sup>6</sup> Soliton- like

<sup>7</sup> Pulse-Compression

<sup>8</sup> Optical- switching

<sup>9</sup> Amplifier

<sup>10</sup> Erbium-Doped Fiber Amplifiers

برای سیستم‌های موج- نور<sup>۱</sup> اپتیک فیبر مفید است [۱۸]. استفاده از آنها منجر به یک انقلاب واقعی در طراحی سیستم‌های های موج- نور چندکاناله شد [۱۰]. بعد از سال ۲۰۰۰، دو اثر غیرخطی پراکندگی رامان القاشده و آمیختگی چهار موج، برای گسترش انواع جدید تقویت‌کننده‌های فیبر- نوری به کار گرفته شد. چنین تقویت‌کننده‌هایی به فیبرهای آلاییده احتیاج نداشتند و در هر ناحیه طیفی می‌توانستند عمل کنند. استفاده از تقویت‌کننده رامان در سیستم‌های ارتباطات مدرن کاملاً رایج شد [۱۹]. تقویت‌کننده‌های پارامتری اپتیک فیبر بر پایه آمیختگی چهارموج به علت پتانسیل‌شان برای پردازش سیگنال<sup>۲</sup> فوق- سریع جالب و جذاب هستند [۲۰].

همچنین پیدایش تقویت‌کننده‌های فیبری تحقیق روی سالیتون‌های نوری را تقویت کرد و نهایتاً منجر به پیدایش انواع جدید سالیتون‌ها نظیر سالیتون‌های پاشندگی- مدیریت شده<sup>۳</sup> و سالیتون‌های اتلافی<sup>۴</sup> شد [۲۱].

فیبرهای گریٹینگ<sup>۵</sup> در سال ۱۹۸۷ ساخته شدند، و در دهه ۱۹۹۰ این فیبرها به جزء جدایی‌ناپذیر تکنولوژی موج- نور شد [۲۲].

از سال ۱۹۹۶، انواع جدید فیبرها، با نامهایی نظیر فیبرهای کریستال فوتونیک<sup>۶</sup>، فیبرهای حفره‌دار<sup>۷</sup>، فیبرهای میکروساختار<sup>۸</sup>، و فیبرهای شیبدار<sup>۹</sup>، گسترش یافتند. تغییرات ساختاری در چنین فیبرهایی بر خصوصیات پراکنده‌شان و همچنین خصوصیات غیرخطی‌شان اثر می‌گذارد. مخصوصاً، طول موجی که در آن پاشندگی سرعت گروه به سمت صفر میل می‌کند، به سمت ناحیه مرئی شیفیت پیدا می‌کند. ضمناً، اثرات غیرخطی به دلیل ساین نسبتاً کوچک هسته، به طور

<sup>1</sup> Lightwave

<sup>2</sup> Signal Processing

<sup>3</sup> Dispersion Managed Solitons

<sup>4</sup> Dissipative Solitons

<sup>5</sup> Fiber gratings

<sup>6</sup> Photonic Crystal Fibers

<sup>7</sup> Holey Fibers

<sup>8</sup> Microstructure Fibers

<sup>9</sup> Tapered Fibers

قابل ملاحظه‌ای افزایش می‌یابد. این ترکیب منجر به تولید فوق‌پیوستار<sup>۱</sup> میشود. در تولید فوق‌پیوستار طیف نوری پالس-های فوق‌کوتاه با ضریبی بیشتر از ۲۰۰ در طول فیبر  $1\text{ m}$  یا کمتر پهن می‌شود [۲۴]. با این پیشرفت‌ها رشته اپتیک فیبر غیرخطی بعد از سال ۲۰۰۰ به طور قابل ملاحظه‌ای رشد پیدا کرده و انتظار می‌رود در سال‌های آینده همان طور ادامه داشته باشد. با تولید پالس‌های فوق‌کوتاه مطالعه اثرات پاشندگی و غیرخطی مراتب بالا اهمیت بیشتری یافت و در سال‌های اخیر مطالعات زیادی در این زمینه انجام شده‌است.

در پایان‌نامه حاضر فصل اول در برگرفته‌ی مروری کوتاه بر تاریخچه‌ی اپتیک فیبر غیرخطی می‌باشد. که در آن به ظهور سالیتون‌ها و روند پیشرفت اپتیک فیبر غیرخطی اشاره شده‌است. در فصل دوم به معرفی سیستم‌های سالیتونی با تفصیل بیشتری پرداخته می‌شود، ابتدا خواص محیطی فیبر نوری که حامل پالس‌های سالیتونی است به صورت خلاصه آورده میشود؛ بعد معادله‌ی حاکم بر سالیتون‌های اپتیکی معرفی و شکل ساده‌ی شده آن بررسی می‌شود، به اثرات پاشندگی و غیرخطی مراتب بالا نیز به اجمال اشاره شده است، این اثرات برای پالس‌های کوتاه دارای اهمیت هستند و باعث تغییر شکل سالیتون‌ها شده و در بعضی موارد منجر به شکافت سالیتون به اجزایش می‌شود. فصل ۳ به معرفی روش‌های عددی حل معادله غیرخطی شرودینگر، تقسیم گام فوریه و تفاضل-محدود حوزه-زمان اختصاص دارد. در این فصل مقایسه‌ای بین این دو روش انجام شده‌است. فصل چهارم دربرگیرنده شبیه‌سازی‌های انجام شده‌است. در این فصل بیشتر به بررسی انتشار سالیتون‌های فوق‌کوتاه پرداخته شده‌است. در انتها در فصل پنجم جمع‌بندی و نتایج حاصل ارائه شده‌است و پیشنهادهایی جهت ادامه کار مطرح می‌شود.

<sup>1</sup> Supercontinuum Generation

## فصل دوم:

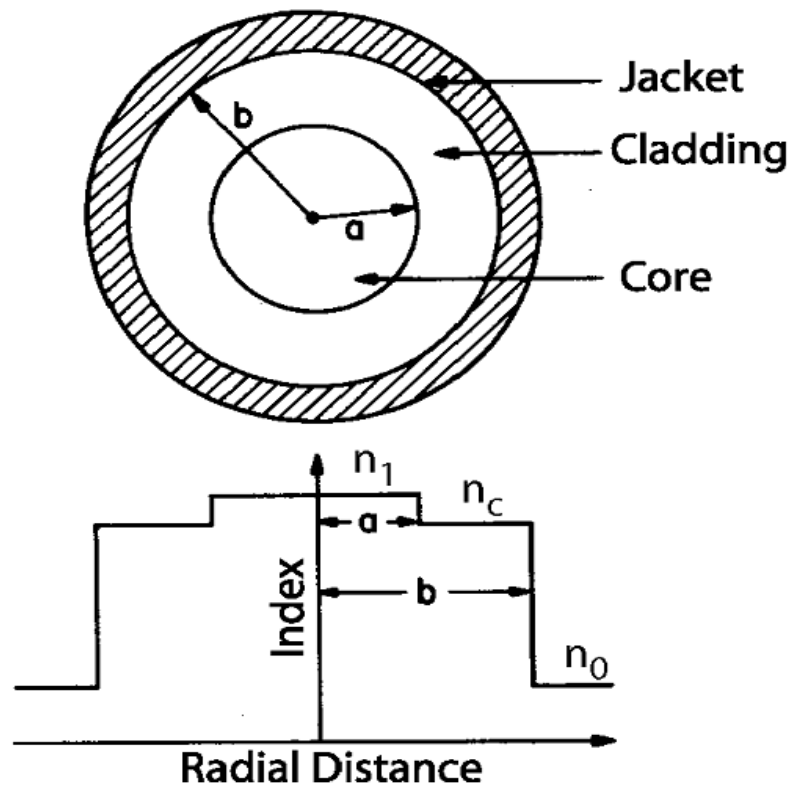
سیستم‌های سالیتمونی



## مشخصات فیبر

۱-۲

در ساده‌ترین شکل، یک فیبر نوری شامل یک هسته شیشه‌ای مرکزی که به وسیله یک لایه روکش فلزی که ضریب شکست آن  $n_c$  اندکی کمتر از ضریب شکست هسته  $n_1$  است، احاطه شده‌است. چنین فیبرهایی را ضریب شکست پله‌ای<sup>۱</sup> می‌نامند. در نوع دیگری از فیبرها ضریب شکست هسته به تدریج از مرکز به سمت مرز هسته کاهش می‌یابد، چنین فیبرهایی را ضریب شکست تدریجی<sup>۲</sup> می‌نامند [۲۵]. شکل ۱-۲ به طور شماتیک سطح مقطع و پروفایل ضریب شکست یک فیبر ضریب شکست پله‌ای را نشان می‌دهد.



شکل ۱-۲: تصویر شماتیک سطح مقطع و پروفایل ضریب شکست یک فیبر ضریب شکست پله‌ای [۳۱]

<sup>1</sup> Step-Index Fibers

<sup>2</sup> Graded-Index Fibers

دو پارامتر اختلاف نسبی ضریب شکست هسته-روکش

$$\Delta = \frac{n_1 - n_c}{n_1} \quad (1-2)$$

و پارامتر  $V$  که چنین تعریف می‌شود

$$V = K_0 a (n_1^2 - n_c^2)^{\frac{1}{2}} \quad (2-2)$$

مشخصات فیبر را توصیف می‌کنند، که در آن  $K_0 = \frac{2\pi}{\lambda_0}$  و  $a$  شعاع هسته است،  $\lambda_0$  طول موج نور است.

پارامتر  $V$ ، تعداد مدهایی که توسط فیبر حمایت می‌شود را مشخص می‌کند. یک فیبر ضریب شکست پله‌ای اگر  $V < 2.405$  باشد یک تک‌مد<sup>۱</sup> را حمایت می‌کند. اگر فیبر نوری طوری طراحی شود که این شرط را ارضا کنند، فیبر تک‌مد نامیده می‌شود. مهمترین تفاوت بین فیبرهای تک‌مد و چندمد<sup>۲</sup>، سایز هسته است. به طور نمونه شعاع هسته  $a$  برای فیبرهای چندمد  $25 \mu m$  است. فیبرهای تک‌مد با  $\Delta \approx 0.003$  باید شعاعی کمتر از  $5 \mu m$  داشته باشند. مقدار عددی شعاع بیرونی  $b$  اگر به اندازه کافی بزرگ باشد تا مدهای فیبر را کاملاً محبوس کند، کمتر بحرانی است. یک مقدار استاندارد  $b = 62.5 \mu m$  به طور عادی برای هر دوی فیبرهای تک‌مد و چندمد استفاده می‌شود. از آنجایی که اثرات غیرخطی اساساً با استفاده از فیبر تک‌مد مطالعه می‌شود، جمله فیبر نوری در این متن به فیبرهای تک‌مد اشاره می‌کند (مگر این که به ترتیب دیگری ملاحظه شود).

## ۲-۲ اتلاف فیبر

اتلاف فیبر با کاهش توان میانگین رسیده به دریافت‌کننده، عامل اصلی محدودکننده در فیبر نوری است. چون گیرنده‌های نوری نیازمند مقدار مینیمم توان برای بازیابی صحیح سیگنال هستند، فواصل انتقال به طور ذاتی با اتلاف فیبر محدود می‌شوند. در حقیقت استفاده از فیبرهای سیلیکایی برای ارتباطات نوری تنها زمانی عملی می‌شود که اتلاف به سطح قابل قبولی کاهش یابد، تا به فواصل انتقال  $10 km$  یا بیشتر دست یابیم.

<sup>1</sup> Single-Mode Fibers

<sup>2</sup> Multimode Fibers

## ۱-۲-۲ ضریب تضعیف

یک پارامتر مهم فیبر اندازه‌ای از اتلاف توان در طول انتقال سیگنال‌های نوری داخل فیبر را فراهم می‌کند. اگر  $P_0$  توان فرودی در ورودی یک فیبر به طول  $L$  باشد، توان انتقال یافته  $P_T$  با رابطه زیر داده می‌شود.

$$P_T = P_0 \exp(-\alpha L) \quad (۳-۲)$$

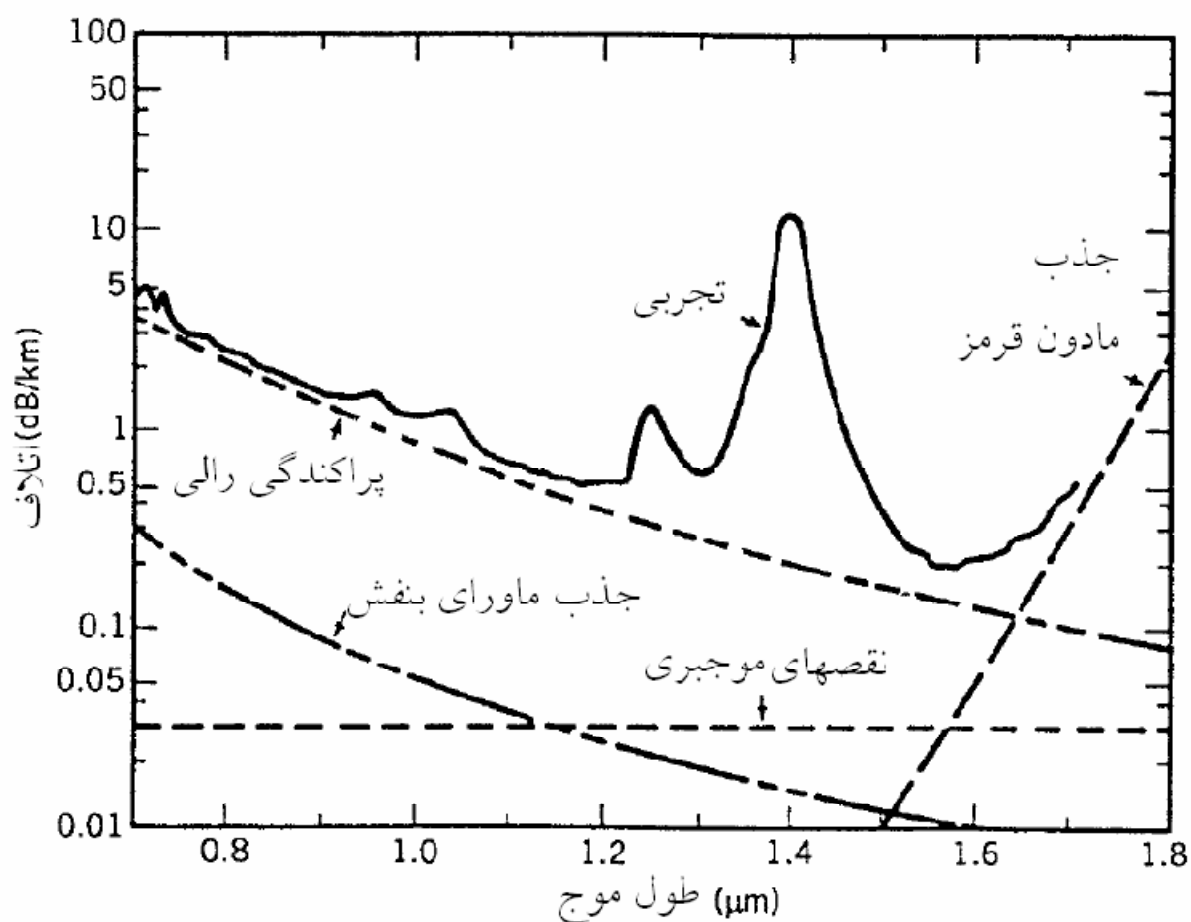
که در آن  $\alpha$  ضریب تضعیف<sup>۱</sup> اندازه‌ای از اتلاف‌های کلی فیبر از تمام منابع است. معمولاً  $\alpha$  با استفاده از رابطه (۲-۴) بر حسب واحد  $\frac{dB}{Km}$  بیان می‌شود:

$$\alpha_{dB} = -\frac{10}{L} \log\left(\frac{P_T}{P_0}\right) = 4.34\alpha \quad (۴-۲)$$

که معادله (۳-۲) برای ارتباط  $\alpha$  و  $\alpha_{dB}$  استفاده شده است.

اتلاف فیبر به طول موج نور بستگی دارد. شکل ۲-۲ طیف اتلاف  $\alpha(\lambda)$  را برای یک فیبر تک‌مد با قطر هسته  $9.4 \mu m$  و  $\Delta = 1.9 \times 10^{-3}$  و طول موج  $1/\mu m$  را نشان می‌دهد [۲۶].

<sup>۱</sup> Attenuation Constant



شکل ۲-۲: طیف اتلاف برای فیبر تک‌مد تولید شده در ۱۹۷۹ وابستگی طول موجی چندین مکانیزم پایه‌ی اتلاف نیز نشان داده شده‌است.

این فیبر تنها اتلافی در حدود  $0.2 \frac{dB}{Km}$  در محدوده نزدیک طول موج  $1.55 \mu m$  را نشان می‌دهد. این کمترین مقدار اتلافی است که در ۱۹۷۹ تحقق یافت. این مقدار نزدیک حد اصلی حول  $0.15 \frac{dB}{Km}$  برای فیبرهای سیلیکا است. طیف اتلاف همچنین یک قله‌ی بزرگ نزدیک  $1.39 \mu m$  و چند قله‌ی کوچکتر دیگر نشان می‌دهد. مینیمم دوم در نزدیکی  $1.3 \mu m$  رخ می‌دهد. که اتلاف فیبر زیر  $0.5 \frac{dB}{Km}$  است. چون پاشندگی فیبر نزدیک  $1.3 \mu m$  مینیمم می‌شود، این پنجره اتلاف-پایین برای سیستم‌های ارتباط نوری به کار می‌رود. برای طول موج‌های کوتاه‌تر، اتلاف به طور قابل توجهی بالا می‌رود و در ناحیه مرئی طیف نور به  $5 \frac{dB}{Km}$  می‌رسد.

چندین عامل در اتلاف سهم دارند. سهم نسبی‌شان در شکل ۲-۲ نشان داده شده‌است. دو مورد مهم‌شان جذب مادی و

پراکندگی رالی است.