



دانشگاه پیام نور مرکز شیراز  
دانشکده علوم  
گروه علمی فیزیک

پایان نامه  
برای دریافت درجه کارشناسی ارشد  
در رشته فیزیک

انتشار موج در فیبرها با آثار غیرخطی و پاشندگی  
مراتب بالاتر

استاد راهنما  
دکتر عبدالرسول قرائتی جهرمی

استاد مشاور  
دکتر پرویز الهی

توسط  
الهام آریابد

مهرماه 1378



دانشگاه پیام نور  
بسمه تعالی  
تصویب پایان نامه / رساله

پایان نامه تحت عنوان : انتشار موج در فیبرها با آثار غیرخطی و پاشندگی مراتب بالاتر  
که توسط الهام آریابد در مرکز شیراز تهیه و به هیأت داوران ارائه گردیده است مورد تأیید  
می باشد.

تاریخ دفاع: 1387/7/27      نمره: 18/8      درجه ارزشیابی : عالی

اعضای هیأت داوران:

<u>نام و نام خانوادگی</u>	<u>هیأت داوران</u>	<u>مرتبه علمی</u>	<u>امضاء</u>
1- دکتر عبدالرسول قرائتی جهرمی	استاد راهنما	استادیار	
2- دکتر پرویز الهی	استاد مشاور	استادیار	
3- دکتر محسن حاتمی	استاد داور	استادیار	
4- دکتر نرگس عباسی	نماینده تحصیلات تکمیلی	استادیار	

تقدیم به

# همسر مهربان و فداکارم

سپاس گذاری

سپاس گذار خداوند مهربانم که با الطاف بیکرانیش در تمام مراحل زندگی یاریم می کند.  
از استاد ارجمند و فرزانه ام جناب آقای دکتر عبدالرسول قرائتی جهرمی برای تلاش فراوان و راهنماییهای ارزشمندشان .

قدردان همگامی بی وقفه همسر مهربانم هستم که هر لحظه امید بی دریغش را نثار تمام خستگی هایم کرد و خط به خط حضورش واژه ای شد برای نوشتن.  
از قلب پاک مادرم و ساحت ایثار پدرم برای همه محبت ها، فرزانی ها و تشویق هایشان در تمامی مراحل تحصیل مشوقم بودند.

## چکیده

در این پایان نامه از روش تفاضل محدود در فضای زمانی (FDTD) برای محاسبه اثرهای غیرخطی مراتب بالا از جمله اثر القای پراکندگی رآمان و اثر خود-تیزکنندگی و اثرهای پاشندگی مراتب دوم و سوم رادر فیبرنوری استفاده کرده ایم.

در ابتدا معادله شرودینگر غیرخطی را با اثرهای پاشندگی مراتب دوم و سوم را استخراج کرده و سپس به استخراج مراتب بالای غیرخطی معادله شرودینگر پرداخته ایم. و با روش عددی FDTD معادله شرودینگر غیرخطی را در هر مرحله به ترتیب با جملات پاشندگی مرتبه دوم، مرتبه سوم، اثر القای پراکندگی رآمان و اثر خود تیز-کنندگی در نظر گرفته و نتیجه را در هر مرحله در فضای فرکانس به صورت نمودار نشان داده ایم. و در پایان با در نظر گرفتن تمام این اثرات ابرپیوستگی را شبیه سازی می کنیم و شرایط ایجاد ابر پیوستگی را بر روی فیبرنوری تعیین می کنیم.

## فهرست مطالب

عنوان.....	صفحه .....
فهرست شکل ها.....	ذ.....
چکیده.....	ج.....
پیشگفتار.....	ش.....
<b>فصل اول: فیبر نوری.....</b>	<b>1.....</b>
1-1 مقدمه .....	2.....
2-1 تاریخچه فیبر نوری.....	2.....
3-1 ساخت فیبر نوری.....	6.....
1-3-1 روش بوته مضاعف.....	7.....
4-1 مزایا و کاربردهای فیبرهای نوری.....	9.....
5-1 روش‌های بررسی و مطالعه فیبرها.....	11.....
<b>فصل دوم: آشنایی با کریستال‌های فوتونی.....</b>	<b>13.....</b>
1-2 مقدمه.....	14.....
2-2 تاریخچه.....	14.....
3-2 معرفی کریستال فوتونی.....	16.....
4-2 لزوم استفاده از کریستال فوتونی در صنعت ارتباطات.....	18.....
5-2 کاربرد کریستال‌های فوتونی.....	20.....
1-5-2-1 ساختارهای موجبری.....	20.....
2-5-2-2 تولید لیزر.....	21.....
3-5-2-3 صافی ها.....	22.....
4-5-2-4 محدوده پراکندگی.....	23.....
5-5-2-5 خواص فیزیکی فیبر کریستال فوتونی.....	24.....
6-5-2-6 ایجاد پدیده ابریوستگی.....	27.....

29.....	فصل سوم: انتشار نور در فیبر نوری.....
30 .....	1-3 مقدمه.....
30 .....	2-3 موجبر دی الکتریک تخت .....
31.....	3-3 مدها در موجبر دی الکتریک تخت.....
33.....	4-3 اساس انتشار نور در فیبرهای نوری.....
34.....	5-3 انواع فیبرها.....
34.....	3-5-1-1-فیبرهای ضریب شکست پله‌ای.....
35.....	3-5-2-2-فیبر ضریب شکست تدریجی.....
36.....	3-6 گشودگی عددی.....
38.....	3-7 تضعیف (افت فیبر).....
38.....	3-8 پاشندگی در فیبرهای نوری.....
39.....	3-8-1-1-پاشندگی مادی.....
40.....	3-8-2-2-پاشندگی موجبری.....
40 .....	3-8-3-3-پاشندگی مدی.....
41 .....	3-9 توزیع میدان در فیبر نوری.....

## فصل چهارم: معادله شرودینگر غیر خطی با در نظر گرفتن کلیه آثار غیرخطی و

44.....	پاشندگی های مراتب بالا.....
45 .....	1-4 مقدمه.....
46.....	2-4 فیبر نوری تک مد با ضریب شکست پله‌ای.....
47.....	3-4 معادله انتشار پالس.....
57.....	4-4 مراتب بالاتر اثرهای غیرخطی.....
60.....	4-5 گسترش معادله شرودینگر غیر خطی تا مرتبه سوم پاشندگی.....
63.....	4-6 بررسی تحلیلی معادله شرودینگر غیر خطی در حالت کلی.....
66.....	4-7 مدولاسیون خود-فازی.....

68.....	8-4	مدولاسیون فاز-عرضی.....
69.....	9-4	پراکندگی رآمان القای.....
71.....	10-4	پاشندگی سرعت گروه (GVD).....
75.....	1-10-4	پاشندگی مادی.....
76.....	2-10-4	پاشندگی موجبری.....
77.....	11-4	اثر Walk – off.....
78.....	12-4	فرایند پارامتریک.....
79.....	4-12-1	فرایند پارامتریک ترکیب چهار موج (FWM).....
<b>فصل پنجم: شبیه سازی عددی معادله شرودینگر غیر خطی در کریستال های</b>		
81.....		<b>فوتونی و تولید ابر پیوستگی.....</b>
82.....	1-5	مقدمه.....
82.....	2-5	اثر پاشندگی سرعت گروه.....
85.....	3-5	اثر پاشندگی مرتبه سوم.....
86.....	4-5	اثر خود- تیزکنندگی.....
87.....	5-5	اثر القای رآمان.....
89.....	6-5	اثرات مرتبه بالاتر.....
91.....	7-5	شبیه سازی ابرپیوستگی در فیبرهای کریستال فوتونی.....
99.....		جمع بندی و نتیجه گیری.....
101.....		منابع و مراجع.....



## فهرست شکل ها

عنوان .....	صفحه .....
شکل 1-1 دستگاه فوتوفون بل .....	3.....
شکل 2-1 فرایند ساخت فیبر به روش بوته مضاعف .....	7.....
شکل 3-1 شکل دیاگرام فرایند MCVD که برای تولید فیبر مورد استفاده قرار می گیرد .....	8.....
شکل 1-2 نمودار تعداد مقالات منتشرشده در هر سال .....	14.....
شکل 2-2 انواع کریستال های فوتونی الف) یک بعدی ب) دو بعدی ج) سه بعدی .....	16.....
شکل 3-2 نمونه ساختار طبیعی که دارای نوار گاف فوتونی هستند الف) موش دریایی ب) رشته های قوس .....	17.....
شکل 4-2 کانی یاقوت و کاربرد آن در جواهرات. (ب) ساختار بلوری یاقوت .....	18.....
شکل 5-2 دو نمونه ساختار کریستال فوتونی که در بستر آن ها موجبر هایی وجود دارند .....	21.....
شکل 6-2 شکل 6-2 دو نمونه از صافی های ساخته شده با کریستال فوتونی. سمت راست و چپ یک drop filter را نشان می دهد و در ساختار وسط فرکانسی که در دو ساختار دیگر drop می شود به موجبر سوم منتقل می گردد. ....	22....
شکل 7-2 تصویر میکروسکوپی انتهائی یک فیبر کریستال فوتونی. تصویر سمت راست هسته فیبر را با جزئیات بیشتر نشان می دهد. قطر هسته این تصویر فیبر در حدود 2 میکرومتر است .....	24.....
شکل 8-2 مقطع طولی یک فیبر باریک شده .....	26.....
شکل 9-2 دو نمونه فیبر نوری ساخته شده بر اساس کریستال های فوتونی. در شکل های سمت راست محیط انتشار موج دی الکتریک و در سمت چپ این محیط هوا می باشد (ابعاد ساختارها در حد میکرومتر هستند) شکل وسط در پایین نیز بیانگر دامنه ی موج عبوری است .....	27.....

- شکل 3-1 موجبر دی الکتریک تخت.  $n_1 > n_3, n_1 > n_2$  ..... 30
- شکل 3-2 توزیع میدان برای مد  $TE$  در موجبر دی الکتریک تخت ..... 33
- شکل 3-3 فیبر ضریب شکست پله ای. الف) نمایش تغییرات ضریب شکست ب) چشم انداز انتهائی ج) چشم انداز مقطع طولی ..... 34
- شکل 3-4 فیبر ضریب شکست تدریجی. الف) تغییرات ضریب شکست بر حسب فاصله از محور ب) چشم انداز انتهائی ج) چشم انداز مقطعی ..... 35
- شکل 3-5 مسیر امواج نوری در یک فیبر ضریب شکست تدریجی ..... 36
- شکل 3-6 فیبر فقط امواج نوری تابشی از داخل یک مخروط با نیم زاویه  $q$  را می پذیرد ..... 37
- شکل 3-7 نمایش تغییرات گشودگی عددی بر حسب زاویه پذیرش.  $N_A = \text{Sin} q$  ..... 37
- شکل 3-8 نمونه های توزیع شعاعی میدان  $u(r)$  معادله (3-29) برای  $l = 0, l = 3$  ..... 43
- شکل 4-1 تصویر قسمت عرضی و شکل ضریب شکست پله ای فیبر نوری با ضریب شکست تدریجی را نشان می دهد ..... 47
- شکل 4-2 تغییرات آنتی تابع پاسخ رآمان برای فیبر های سیلیکایی ..... 64
- شکل 4-3 نمایش تراز انرژی (a) پراگندگی استوکس رآمان (b) پراگندگی آنتی استوکس رآمان ..... 70
- شکل 4-4 نمودار تغییرات  $b_2$  بر حسب طول موج برای یک فیبر تک مد ضریب شکست پله ای با  $a = 4\text{mm}, \Delta = 0.003$  پارامتر پاشندگی سرعت گروه  $b_2$  در نزدیکی طول موج  $1 = 1.31\text{mm}$  صفر است ..... 72
- شکل 4-5 نمودار تغییرات پاشندگی  $D$  بر حسب طول موج برای یک فیبر تک مد ضریب شکست پله ای با  $a = 4\text{mm}, \Delta = 0.003$  استفاده از معادله (4-136)  $D$  در نزدیکی طول موج  $1 = 1.31\text{mm}$  صفر است ..... 73
- شکل 4-6 3 نمودار تغییرات پاشندگی کل و ترکیبات آن  $D_M, D_W$  به ترتیب پاشندگی موجبری و پاشندگی مدی بر حسب طول موج برای یک فیبر تک مد ضریب شکست پله ای با  $a = 4\text{mm}, \Delta = 0.003$  ..... 75
- شکل 4-7 نمودار تغییرات ضریب شکست  $n$  بر حسب طول موج برای سیلیکای گداخته و تغییرات ضریب شکست گروه  $n_g$  بر حسب طول موج برای یک فیبر تک مد با ضریب شکست پله ای با  $a = 4\text{mm}, \Delta = 0.003$  ..... 75

76.....

شکل 4-8 نمودار تغییرات  $d_{12}$  بر حسب طول موج برای یک فیبر تک مد ضریب شکست پله ای با

78.....  $a = 4mm, \Delta = 0.003$

شکل 5-1 شکل پالس و طیف نوری آن در فاصله 1.4 برای پالس منتشر شده با پاشندگی عادی با پارامتر

83.....  $N = 1$

شکل 5-2 شکل پالس و طیف نوری آن در فاصله 1.4 برای پالس منتشر شده با پاشندگی غیرعادی با پارامتر

84.....  $N = 1$

شکل 5-3 شکل پالس و طیف نوری آن در فاصله 1.4 برای پالس منتشر شده با  $b_2 = 0$  پاشندگی مرتبه بالاتر

خود دلیلی برای ساختار نوسانی دنباله لبه پالس است.....

شکل 5-4 واپاشی سالیتون مرتبه دوم در اثر القا پراکندگی رامان ( $t_R = 0.01$ ).....

شکل 5-5 واپاشی سالیتون مرتبه دوم در اثر القا اثر خود-تیزکنندگی ( $R = 0.2$ ).....

شکل 5-6 تبدیل فوریه شکل پالس و طیف نوری آن برای  $N = 2, b_3 = 0.03, R = 0.05, t_R = 0.1$ .....

شکل 5-7 الف) طیف شدت پالس ورودی برحسب زمان قبل از ورود به فیبر. ب) طیف شدت پالس خروجی بعد از گذشت

طول  $z=22.5$  متر در فیبر. ج) تبدیل فوریه طیف شدت پالس ورودی برحسب فرکانس قبل از ورود به فیبر. د) تبدیل فوریه

طیف شدت پالس خروجی بعد از گذشت طول  $z=22.5$  متر در فیبر.

92.....  $R = 0.1, t_R = 0.01, P_0 = 2, T_0 = 0.5, b_2 = 0.001, b_3 = 0.001, N = 4$

شکل 5-8 الف) طیف شدت پالس ورودی برحسب زمان قبل از ورود به فیبر. ب) طیف شدت پالس خروجی

بعد از گذشت طول  $z=22.5$  متر در فیبر. ج) تبدیل فوریه طیف شدت پالس ورودی برحسب فرکانس قبل از ورود

به فیبر. د) تبدیل فوریه طیف شدت پالس خروجی بعد از گذشت طول  $z=22.5$  متر در فیبر. داده ها همانند نمودار

(5-7) میباشد با این تفاوت که در اینجا با کاهش پهنای  $b_2 = 0.02$  تعداد قله های فرکانسی افزایش یافته است.

93.....

شکل 5-9 الف) طیف شدت پالس ورودی برحسب زمان قبل از ورود به فیبر. ب) طیف شدت پالس خروجی بعد

از گذشت طول  $z=22.5$  متر در فیبر. ج) تبدیل فوریه طیف شدت پالس ورودی برحسب فرکانس قبل از ورود به فیبر. د)

تبدیل فوریه طیف شدت پالس خروجی بعد از گذشت طول  $z=22.5$  متر در فیبر. داده ها همانند نمودار (5-8) میباشد با

این تفاوت که در اینجا با افزایش توان قله  $P_0 = 4$  تعداد قله های فرکانسی افزایش یافته است.

94.....

شکل 5-10 الف) طیف شدت پالس ورودی برحسب زمان قبل از ورود به فیبر. ب) طیف شدت پالس خروجی بعد

از گذشت طول  $z=22.5$  متر در فیبر. ج) تبدیل فوریه طیف شدت پالس ورودی برحسب فرکانس قبل از ورود به فیبر. د)

تبدیل فوریه طیف شدت پالس خروجی بعد ازگذشت طول  $z=22.5$  متر در فیبر. داده ها همانند نمودار (5-9) میباشد با این تفاوت که در اینجا با اهدش پهنا  $T_0 = 0.3$  تعداد قله های فرکانسی افزایش یافته است..... 95

شکل 5-11. الف) طیف شدت پالس ورودی برحسب زمان قبل ازورود به فیبر. ب) طیف شدت پالس خروجی بعد ازگذشت طول  $z=22.5$  متر در فیبر. ج) تبدیل فوریه طیف شدت پالس ورودی برحسب فرکانس قبل ازورود به فیبر. د) تبدیل فوریه طیف شدت پالس خروجی بعد ازگذشت طول  $z=22.5$  متر در فیبر. داده ها همانند نمودار (5-9) میباشد با این تفاوت که در اینجا با افزایش ضریب رامن  $t_R = 0.1$  تعداد قله های فرکانسی افزایش یافته است..... 96

شکل 5-12. الف) طیف شدت پالس ورودی برحسب زمان قبل ازورود به فیبر. ب) طیف شدت پالس خروجی بعد ازگذشت طول  $z=22.5$  متر در فیبر. ج) تبدیل فوریه طیف شدت پالس ورودی برحسب فرکانس قبل ازورود به فیبر. د) تبدیل فوریه طیف شدت پالس خروجی بعد ازگذشت طول  $z=22.5$  متر در فیبر. داده ها همانند نمودار (5-9) میباشد با این تفاوت که در اینجا با کاهش ضریب غیرخطی  $N = 1$  تعداد قله های فرکانسی کاهش یافته است..... 97

## پیشگفتار

فیبرهای نوری تغییرات اساسی در صنعت مخابرات ایجاد کرده‌اند. بیشترین فیبر نوری که مورد استفاده می‌باشد، فیبر نوری تک - مد با ضریب شکست پله‌ای است. فیبرهای نوری تک مد از یک هسته مرکزی شیشه‌ای (سیلیکا) تشکیل شده است که اطراف آن توسط لایه‌ای با ضریب شکست پایین‌تر از ضریب شکست هسته احاطه شده است. در نتیجه، اختلاف مابین ضریب شکست هسته سیلیکا و پوسته سبب می‌شود که نور در هسته هدایت شود. برای مطالعه عوامل متعدد آثار غیر خطی به طور وسیعی از فیبرهای نوری استفاده می‌شود. با وجود اینکه توانایی اثر غیر خطی در سیلیکای گداخته در مقایسه با تعداد زیادی از فلزات دیگر پایین است ولی به دلیل پایین بودن افت فیبرهای سیلیکایی در طول برهم کنش در سراسر ماده، از آن به عنوان محیطی مناسب برای مشاهده آثار غیر خطی محیط استفاده می‌شود. دلیل دیگر برای استفاده از فیبرهای نوری برای مطالعه اثر غیر خطی آنها، کوچک بودن سطح هسته است.

فیبرهای نوری که ما در این پایان نامه مورد مطالعه قرار می‌دهیم از نوع فیبرهای کریستال فوتونی است. فیبر کریستال فوتونی از یک هسته سیلیکای گداخته که اطراف آن توسط یک کریستال فوتونی دو بعدی با حفره‌های هوا که در طول فیبر گسترده شده، احاطه شده است. حفره‌های هوا با یک تقارن هگزنال در سرتاسر عرض فیبر آرایش پیدا کرده است. اولین نوع کریستال فوتونی در سال 1996 تولید شد. از جمله مزایایی که دارند ساختار میکرو پوسته‌ای آنها است که ضریب شکست آن از هسته پایین‌تر است و نور را خیلی ساده‌تر از یک فیبر تک مد با ضریب شکست ثابت هدایت می‌کند به این نوع فیبرها فیبرهای میکرو ساختار نیز گفته می‌شود. کریستال‌های فوتونی می‌توانند نور را با یک درجه بیشتری محصور کنند که در نتیجه بزرگ بودن اختلاف مابین ضریب شکست هسته و پوسته است. بنابراین هسته این نوع فیبرها می‌توانند حتی کوچکتر از فیبرهای تک مد با ضریب شکست پله‌ای استاندارد ساخته شوند در نتیجه حالت غیر خطی افزایش پیدا می‌کند. اندازه حفره‌های هوا و توزیع حفره‌های هوا در طول ساخت کریستال‌های فوتونی سبب یکی از پدیده‌های قابل توجه غیر خطی می‌شود که به آن ابریوستگی گویند. تولید ابریوستگی در فیبرهای میکروساختاری برای اولین بار توسط رانکا و دیگران گزارش

شده است. ابر پیوستگی منبع تعداد زیادی از کاربردها در صنعت است. آزمایشات اخیر که اولین بار در سال 1970 مشاهده شده و نشان داده که فیبرهای کریستال فوتونی محیط بسیار موثری برای تولید ابر پیوستگی می باشند. ایده استفاده از فیبرهای کریستال فوتونی برای محاسبه اثرات غیرخطی براساس ظرفیت بالای آنها برای پذیرش نور درهسته های خیلی کوچک و افزایش شدت نور در هسته فیبر، برای فیبرهای تک مد استاندارد است.

هدف اصلی این پایان نامه محاسبه اثرات پاشندگی مراتب دوم و سوم و آثار غیر خطی مراتب بالا از جمله اثر پراکندگی القای رآمان و اثر خود تیز کنندگی و همچنین شبیه سازی تولید ابر پیوستگی در فیبرهای نوری است. در فصل اول به معرفی فیبر نوری و بیان تاریخچه ای از آن پرداخته و روش ساخت فیبر و همچنین روش محاسبه عددی فیبرهای نوری را بیان می کنیم. در فصل دوم به معرفی کریستال های فوتونی و کاربردهای آن در صنایع مختلف می پردازیم و سپس به بیان فیبر کریستال فوتونی و مزایای استفاده از آن را مطرح می کنیم. در فصل سوم ابتدا انتشار نور رادر موجبرهای دی الکتریک توضیح داده و سپس در مورد خواص فیبرها و انواع آنها و چگونگی توزیع میدان در آنها بحث می کنیم. در فصل چهارم معادله شرودینگر غیر خطی مراتب بالا را در فیبر کریستال فوتونی به روش تحلیلی استخراج می کنیم. در فصل پنجم به حل عددی معادله شرودینگر غیرخطی پرداخته و در هر مرحله اثرات غیر خطی مرتبه بالا از جمله پراکندگی القای رآمان و اثر خود-تیز کنندگی را همراه با اثر پاشندگی مرتبه دوم و سوم بررسی می کنیم و نتیجه را در تمام مراحل در فضای فرکانس به صورت نمودار به دست می آوریم و در پایان شبیه سازی تولید ابر پیوستگی در فیبر نوری را در فضای زمان و فرکانس به صورت نمودار نشان می دهیم. و شرایط ایجاد ابر پیوستگی را مشخص می کنیم.

# فصل اول

## فیر نوری

## 1-1 -مقدمه

یک نگاه کلی به فناوری فیبرنوری در دو دهه اخیر نشان می‌دهد که کاربرد و تحقیق در مورد آن در سطوح مختلف صنایع نوین به خصوص در صنعت مخابرات چشمگیر بوده است. اختراع لیزر در سال 1960 و ساخت فیبر نوری با افت کم در سال‌های اخیر باعث رشد و توسعه چشمگیری در حوزه فوتونیک شده است. به ویژه، فیبرنوری به عنوان یک محیط انتقال داده‌ها و پیام‌های اطلاعاتی در صنعت مخابرات تحول زیادی به وجود آورده است.

## 2-1 -تاریخچه فیبر نوری

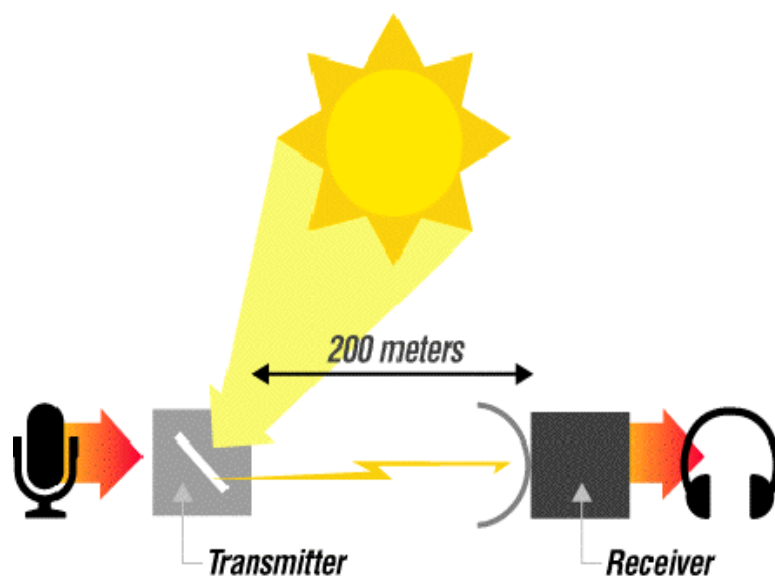
پیدایش سیستم‌های مخابرات به دو قرن قبل برمی‌گردد به زمانی که در سال 1790 مهندسی فرانسوی به نام کلاد چاپ<sup>1</sup> دستگاهی به نام تلگراف نوری<sup>2</sup> را اختراع کرد [1] سیستم او از یک سری دستگاه ارسال علامت تشکیل شده بود که روی برج‌های نصب شده بود و در آنجا انسان‌هایی کار می‌کردند که پیام‌ها از طریق دستی به برج دیگر می‌فرستادند.

اما در نیمه قرن 19 تلگراف الکتریکی جایگزین آن شد. در سال 1880 الکساندر گراهام بل یک سیستم مخابرات نوری به نام فوتوفون<sup>3</sup> را اختراع کرد. در این سیستم، بل از یک آئینه نازک که توسط صدا به لرزه در می‌آمد استفاده نمود. نور خورشید منعکسه از این آئینه اطلاعات را حمل می‌کرد. در گیرنده، این نور خورشید مدوله شده به سیلیندیم هادی نور اصابت می‌کند و در آن به یک سیگنال الکتریکی تبدیل می‌شد. با وجودی که سیستم فوق نسبتاً خوب کار می‌کرد هرگز یک موفقیت تجاری کسب نکرد. ابداع لامپهای ساخته بشر منجر به ساخت سیستمهای مخابراتی ساده مثل، چراغهای چشمک زن بین دو کشتی و یا بین کشتی و ساحل گردید. [2] (شکل 1-1)

---

1.Cloud Chappe  
2.Optical tele graph  
3.Photo phone





شکل 1-1 دستگاه فوتوفون بل

در طول سالها، تکنولوژی جدیدی به طور آهسته به وجود آمد که سرانجام شکل انتقال نور را ارا نه داد. این تکنولوژی به پدیده انعکاس کلی داخلی وابسته بود که در آن نور در داخل ماده‌ای که اطراف آن توسط ماده‌ای دیگر با ضریب شکست پایین‌تر احاطه شده منتقل می‌شد [2]

در سال 1840 یک فیزیک دان سوئیسی به نام دانیال کولدون<sup>1</sup> همراه با یک فیزیکدان فرانسوی به نام جاکوب بالینل<sup>2</sup> نشان دادند که نور می‌تواند از داخل یک حوض آب به بیرون هدایت شود [3].

در سال 1854 یک فیزیکدان بریتانیایی به نام جان تیندال<sup>3</sup> برای اولین بار هدایت نور را اثبات و از آن استفاده کنند. پس از سالها دانشمندان دریافتند که می‌توان از میله‌های شفاف شیشه‌ای یا پلاستیکی به عنوان فیبر نوری استفاده کرد. در طول سال 1920 جان لوژی بارید<sup>4</sup> در انگلستان و کلارنس هانسل<sup>5</sup> در ایالت متحده ایده استفاده از نی‌های تو خالی آرایش یافته یا لوله‌های شفاف برای انتقال تصویر برای تلویزیون را ثبت کردند. به‌رحال اولین شخصی که انتقال تصویر را از یک دسته فیبر نوری شرح داد دانشجوی پزشکی به نام هنریک لام<sup>6</sup> در مونیخ بود هدف او دیدن قسمت‌های داخلی بدن که غیر

4. Daniel Collodon

5. Jacques Balainel

6. John Tyndall

4. John Logie Barid

5. Clarence W. Hansel

6. Heinrich Lamm

قابل دسترسی هستند بود و در مقاله‌ای در سال 1930 انتقال تصویر از یک رشته لامپ الکترونیکی از داخل یک مجموعه با کوتاه را منتشر کرد.

بعد از آن دانشمندان زیادی روی فیبرها کار کردند و تا اینکه دانشمندی هلندی به نام ون‌هیل<sup>1</sup> فیبر شیشه‌ای یا پلاستیکی بدون روپوشی را با یک پوسته شفاف با ضریب شکست پایین‌تر پوشش داد. این پوشش سبب می‌شد که انعکاس کلی از سطح با ضریب شکست بالاتر عبور کند. و نور بتواند از فاصله دورتری منتقل شود.

گام موفقیت آمیز بعدی ظهور فیبرهای شیشه-پوسته<sup>2</sup> بود که توسط دانشجویی به نام لورنس کورتیس از مشیگان بود. و تا سال 1960 فیبرهای شیشه-پوسته تضعیفی در حدود یک  $\text{dB}/\text{km}$  داشتند که برای تصاویر پزشکی مناسب بودند اما برای مخابرات این مقدار خیلی زیاد بود. افت  $1 \text{ dB}/\text{km}$  برای بررسی کردن داخل بدن مناسب بود ولی چون ارتباطات روی فواصل طولانی بود احتیاج به افتی داشتند که کمتر از 10 تا 20  $\text{dB}/\text{km}$  باشد.

در سال 1966 دانشمندانی به نام کاو و هوکام پیش بینی کردند که افت فیبر تازیر  $20 \text{ dB}/\text{km}$  می‌تواند کاهش یابد و پس از گذشت چهار سال محققن به ایده کاو در مورد افت  $20 \text{ dB}/\text{km}$  رسیدند و راههای مختلفی را برای اثبات آن ارائه دادند.

چندین سال بعد، افت فیبر به طور قابل توجهی پایین آمد و بزودی فیبرهای تک مد دارای قطر هسته‌ای چندین میکرون ساخته شد. اولین سیستمی که تولید شد توانست نور را در حدود چندین کیلومتر بدون تکرار کننده عبور دهد اما این روش محدود بود. افت این فیبرها در حدود  $2 \text{ dB}/\text{km}$  بود. دومین سیستمی که ساخته شده افت فیبر در آن حدود  $0.5 \text{ dB}/\text{km}$  بود. [1]

پس از فرایندهایی که در تکنولوژی ساخت فیبر به وجود آمد سبب ساخت فیبری با افتی در حدود  $0.2 \text{ dB}/\text{km}$  در محدوده‌ی طول موج  $1.55 \mu\text{m}$  شد با وجود پیشرفتهایی که برای کم کردن اثر اتلاف درون فیبر صورت گرفته بود، عوامل دیگری نظیر پاشندگی، آثار غیر خطی پراکندگی رامان و ... وجود داشتند که ارتباطات را دچار مشکل می‌کردند.

---

1. Abraham Vanheel

2. Gloss - Clade

عامل پاشندگی از وابستگی سرعت موج درون فیبر به فرکانس آن نتیجه می‌شود، و باعث پهن شدن پالس ورودی می‌گردد. پراکندگی رامان نیز که به علت برخورد امواج نور ورودی با مولکولهای محیط ایجاد می‌شود و روی پالس ورودی و در نتیجه از بین رفتن اطلاعات موجود در آن می‌شود.

در سال 1973 ترکیبی از پدیده‌های غیر خطی جدیدی ساخته شد که در آن فیبرهای نوری می‌توانند پالس‌های سالیتمونی را پوشش دهند که این اثر در نتیجه تأثیر متقابل بین اثرهای پاشندگی و اثرهای غیر خطی است. این گونه پالس‌های همان امواج منفردی هستند که برای اولین بار توسط راسل مشاهده شده بود. [4]. هاسیگاوا و تاپرت نشان دادند که معادله حاکم بر انتشار پالس الکترو مغناطیسی در فیبرهای نوری، معادله غیر خطی شرودینگر مرتبه سوم می‌باشد که جواب‌های سالیتمونی آن می‌تواند بدون تغییر شکل در فیبر منتشر شود. [5]

در سال 1950 این جواب پیش بینی شده برای معادله غیر خطی شرودینگر توسط مولنور و همکارانش در آزمایشگاه مشاهده شد. اما در هیچ یک اثر پراکندگی رامان منظور نگردید. تا اینکه در سال 1985 دریافتند که طیف یک پالس کوتاه نوری منتشر شده در فیبر می‌تواند به سمت طول موجهای بزرگتر (قرمز) جابجا شود و در سال 1986 در آزمایشگاه توسط یک لیزر قفل شدگی - مد مشاهده شد. [5].

پراکندگی رامان پدیده‌ای است که در اثر برخورد ناکشسان نور ورودی و مولکولهای محیط بوجود می‌آید. این برخورد باعث انتقال انرژی و در نتیجه جابجایی فرکانس نور ورودی می‌شود. [5].

فیبرهای کریستال فوتونی (PCFs)<sup>1</sup> برای اولین بار در سال 1996 ساخته شدند [4]. اثرهای غیر خطی از سال 1995 در فیبرهای کریستال فوتونی مورد بررسی قرار گرفتند و به طور قابل ملاحظه‌ای در ابتدای این قرن توسعه پیدا کرده است که امروزه کاربردهای زیادی دارند. که از جمله آن تولید ابر پیوستگی در نتیجه ترکیب آثار غیرخطی است.

---

<sup>1</sup>.Photonic Crystal Fibers

لیزرها، نور همدوس را تقریباً در یک طول موج گسیل می کنند. ابر پیوستگی در نتیجه پهن شدگی طیف در طول موج های قابل رؤیت با خاصیت های نور لیزر است. به عبارت دیگر ابر پیوستگی، نور همدوس سفید است. اولین بار در سال 1970 زمانی که آلفانو و شاپیرو<sup>1</sup> پالس های پیکوثانیه را در یک نمونه شیشه ای متمرکز کردند مشاهده شد. چنین پهن شدگی مشابه ای را در  $H_2O$  و  $D_2O$  در سال 1977 مشاهده کردند. در سال 1987 با اختراع لیزرهای فوق العاده سریع که پالس های پیکوثانیه در طول موج های تجاری 1310 و 1550 نانومتری تولید می کردند، در یک فیبر نوری تک مد پدیده ابر پیوستگی مشاهده شد. تولید ابر پیوستگی در یک فیبرهای کریستال فوتونی برای اولین بار در سال 1999 توسط رانکا و دیگران ساخته شد. هدف آنها تولید پهنای باند بزرگ بود. [6]

این پایان نامه آثار غیر خطی در فیبرهای کریستال فوتونی مورد بحث قرار می دهد و شبیه سازی تولید ابر پیوستگی را در فیبرها نشان می دهد.

### 3-1- ساخت فیبر نوری

ماده انتخابی برای فیبرهای نوری با افت کم، شیشه سیلیکایی خالص است که با مولکولهای  $SiO_2$  ترکیب شده است. اختلاف ضریب شکست مابین هسته و پوسته با استفاده از انتخاب یک ناخالصی در طول فرایند ناخالص ساز به وجود می آید ناخالصی هایی همچون  $GeO_2$  و  $P_2O_5$  سبب افزایش ضریب شکست سیلیکای خالص می شود و برای هسته مناسب است. بهر حال، برای پوسته ماده ای همچون بورت و فلوئور استفاده می گردد چون سبب کاهش ضریب شکست سیلیکا می شوند. اضافه کردن ناخالصی ها می تواند با استفاده از شرایط ویژه انجام گیرد. برای نمونه برای ساخت فیبرهای تقویت کننده و لیزرها، هسته سیلیکایی را با یونهای کمیاب حاکی با استفاده از ناخالصی هایی همچون  $ErCl_3$  و  $Nd_2O_3$  ترکیب می کنند.