بسم الله الرحمن الرحيم

**دانشکده فیزیک**

**پایان نامه تحصیلی برای دریافت درجه کارشناسی ارشد رشته فیزیک گرایش فوتونیک**

---

# بررسی عوامل موثر بر رابطه پاشندگی در پراکندگی القایی رامان برای فیبر بلور فوتونی

---

**مؤلف :**

**طوبی ایزدی**

**استاد راهنما :**

**دکتر فریده شجاعی**

**استاد مشاور :**

**دکتر علیرضا بهرامپور**

**شهریورماه ۱۳۹۱**

دانشگاه شهید باهنر کرمان

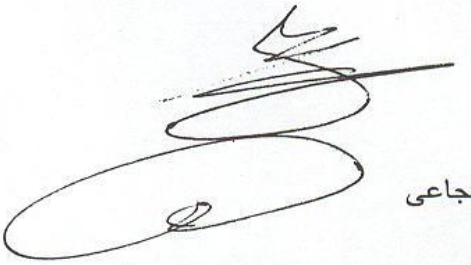
این پایان نامه به عنوان یکی از شرایط احراز درجه کارشناسی ارشد به

**گروه فیزیک**

**دانشکده فیزیک**

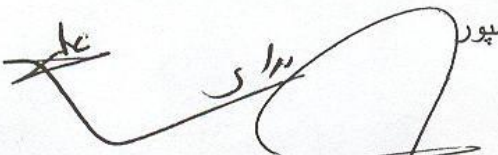
**دانشگاه شهید باهنرکرمان**

تسلیم شده است و هیچ گونه مدرکی به عنوان فراغت از تحصیل دوره مزبور شناخته نمی شود.

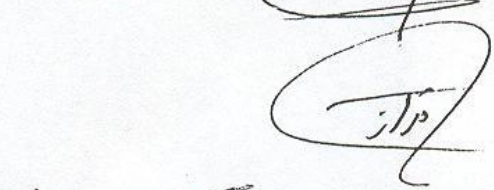


دانشجو: طوبی ایزدی

استاد راهنما: خانم دکترقریده شجاعی



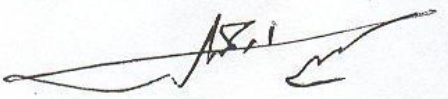
استاد مشاور: دکترعلیرضا بهرامپور



داور ۱: دکترمحمدحسین زندی



داور ۲: دکتر مجید تراز



نماینده تحصیلات تکمیلی: دکترحمید ارجمند کرمانی

حق چاپ محفوظ و مخصوص به دانشگاه شهید باهنر است.

تقدیم به پدر بزرگوارم

که زیباترین نقش نگارستان خاطره‌ام، سیمای مهربان اوست.

تقدیم به مادر عزیزم

که مهربانی او به وسعت دریاست. او که با لبانش بارگاه دعاست و نگاهش بدرقه همیشگی راهم است.

سپاس و ستایش خداوندی را سزاست که عشق به آموختن را در انسان به ودیعه نهاد.

سپاسگزار کسانی هستم که سرآغاز تولد من هستند.از یکی زاده می‌شوم و از دیگری جاودانه.
استادی که سپیدی را بر تخته سیاه زندگیم نگاشت .

از استاد راهنمای محترم، سرکار خانم دکتر فریده شجاعی که با سعه صدر، حوصله و دقت نظری که داشتند و با رهنمودهای رفتاری، اخلاقی وعلمی در تمام مدت کار، همراه من بودند، کمال تقدیر و تشکر را دارم.

همچنین از استاد مشاور محترم، جناب آقای دکترعلیرضا بهرام‌پور که در عین گشاده‌رویی و تواضع فراوان با راهنمایی‌های موثر خویش، راهگشای این پایان نامه بودند، نیز سپاسگزارم.

## چکیده:

هدف از انجام این پایان نامه، بررسی عوامل موثر بر پاشندگی در پراکندگی القایی رامان برای فیبر بلور فوتونی است. پراکندگی القایی رامان، ابزاری برای مطالعه سطوح انرژی ارتعاشی مولکول‌ها و ارتعاشات شبکه در بلور می‌باشد. وقتی یک پرتو لیزر قوی درون مولکول منتشر می‌شود، مدهای درون مولکول به ارتعاش در می‌آیند. بر هم کنش غیرخطی امواج و ماده ناشی از پذیرفتاری رامان مرتبه سوم می‌باشد. پذیرفتاری رامان (پاسخ غیرخطی مولکول (ماده) نسبت به شدت میدان اعمالی)، خود شامل دو قسمت حقیقی و موهومی است. قسمت حقیقی آن به پاشندگی و قسمت موهومی به بهره فرآیند مربوط می‌شود، که ما در اینجا به قسمت حقیقی آن می‌پردازیم. در کارهای قبلی انجام شده، میدان وارد بر مولکول شامل دو جمله میدان لیزری و میدان استوکس بوده است. در این پایان نامه، میدان وارد شده بر مولکول، شامل سه جمله میدان لیزری، استوکس و آنتی استوکس قرار دادیم. پذیرفتاری استوکس رامان را بر حسب فرکانس ارتعاشی مختلف بررسی کردیم. از طرفی، ضریب جذب و ضریب کوپل شدگی استوکس و ویژه مقدار بهره جفت شدگی را برای دو حالت با تطبیق فاز مختلف بررسی کردیم و در آخر عوامل موثر بر پاشندگی را مورد بررسی قرار داده‌ایم.



واژه‌های کلیدی: فیبر بلور فوتونی، پراکندگی رامان القایی، پذیرفتاری، پاشندگی

## فهرست

**عنوان** **صفحه**


**فصل اول: معرفی..... ۱**

۱-۱ مقدمه..... ۲

۱- ۲ اثر خود به خودی رامان..... ۳

۱-۳ پراکندگی القایی رامان..... ۴

۱-۴ بلور فوتونی..... ۵

۱-۵ سیستم ارتباطات نوری..... ۸

۱-۶ فیبر بلور فوتونی..... ۱۰

**فصل دوم: پراکندگی..... ۱۲**

۲-۱ مقدمه بر اپتیک غیرخطی..... ۱۳

۲-۲ اصول غیرخطی..... ۱۴

۲-۳ معادله موج برای محیط اپتیکی غیرخطی..... ۱۷

۲-۴ پراکندگی نور..... ۲۰

۲-۴-۱ پراکندگی خود به خودی نور..... ۲۰

۲-۴-۲ نوسانات، منشأ پراکندگی نور..... ۲۱

۲-۴-۳ تعاریف مربوط به پراکندگی نور..... ۲۲

۲-۵ پراکندگی رامان..... ۲۳

۲-۵-۱ توصیف کوانتومی پراکندگی رامان..... ۲۶

۲-۵-۱-۱ پراکندگی خود به خودی رامان..... ۲۸

۲-۵-۱-۲ پراکندگی القایی رامان..... ۳۱

**فصل سوم: بلور فوتونی، فیبر نوری و بلور فوتونی..... ۳۳**

۳-۱ بلور فوتونی..... ۳۴

۳-۲ انواع بلور فوتونی..... ۳۸

۳-۲-۱ بلور فوتونی یک بعدی..... ۳۸

۳-۲-۲ بلور فوتونی دو بعدی و سه بعدی..... ۳۹

۳-۳ معادلات ماکسول..... ۴۰

۳-۴ قضیه بلاخ..... ۴۳

۳-۵ اصل وردشی الکترومغناطیس..... ۴۶
۳-۶ منشا باند توقف فوتونی..... ۴۶
۳-۷ فیبر نوری..... ۴۸
۳-۸ خواص فیبر نوری..... ۵۱
۳-۸-۱ بازتاب کلی..... ۵۱
۳-۸-۲ روزنه (گشودگی) عددی..... ۵۴
۳-۸-۳ پاشندگی فیبر..... ۵۵
۳-۸-۴ جمع.آوری نور و انتقال..... ۵۶
۳-۸-۵ میرایی فیبر..... ۵۶
۳-۸-۶ جذب..... ۵۶
۳-۸-۷ پراکندگی..... ۵۶
۳-۸-۸ نفوذ نور در پوسته..... ۵۶
۳-۹ مزیت‌های سیستم فیبر نوری..... ۵۷
۳-۹-۱ توانایی انتقال اطلاعات زیاد..... ۵۷
۳-۹-۲ کابل غیر فلزی..... ۵۷
۳-۹-۳ پایین‌ترین اتلاف انتقال..... ۵۷
۳-۹-۴ قیمت ارزان..... ۵۸
۳-۱۰ انواع فیبر..... ۵۸
۳-۱۱ فیبر بلور فوتونی..... ۶۱
**فصل چهارم: پراکندگی القایی رامان در چارچوب الکترومغناطیس..... ۶۵**
۴-۱ مقدمه..... ۶۶
۴-۲ توصیف پراکندگی القایی رامان با استفاده از قطبش غیرخطی..... ۶۸
۴-۳ معادلات جفت شده SRS..... ۷۷
۴-۴ بررسی توان استوکس و آنتی استوکس در پراکندگی القایی رامان..... ۸۰
**فصل پنجم: نتیجه‌گیری..... ۹۴**
۵-۱ نتیجه‌گیری..... ۹۵
**فهرست منابع..... ۹۶**

# فصل اول

## معرفی

## ۱-۱ مقدمه:

در این فصل ابتدا به تاریخچه، مفاهیم، ویژگی‌ها و کاربردهای انواع پراکندگی‌ها از جمله پراکندگی رامان که در حوزه‌ی اپتیک غیرخطی می‌باشد، پرداخته شده که خود شامل دو فرآیند خود به خودی و القایی است. فرآیند خود به خودی فرآیندی ضعیف است و در میدان‌های لیزر قوی از پراکندگی القایی استفاده می‌شود. در ادامه به تاریخچه، مفاهیم، ویژگی‌های بلورهای فوتونی، فیبر نوری و فیبر بلور فوتونی پرداخته و در نهایت، اثر پراکندگی القایی رامان در فیبرهای بلور فوتونی و عوامل مختلف بر پاشندگی آن‌ها مورد بررسی قرار می‌گیرد.

پراکندگی یک پدیده‌ی فیزیکی طبیعی است که برای پرتوهایی مانند نور، صدا یا ذرات متحرک رخ می‌دهد و آنها مجبور به تغییر مسیر حرکت خود از میان ذرات یک ماده که در حال عبور از آن هستند، می‌شوند. پراکندگی نور به عنوان نتیجه‌ای از بر هم کنش آن با ماده (مولکول)، می تواند به صورت کشسان (پراکندگی ریلی[۱] یا مای تیندل[۲]) یا غیر کشسان (پراکندگی رامان[۳] یا بریلیون[٤] ) طبقه بندی شود. در حالت اول ، نور پراکنده شده با فرکانس نور فرودی یکسان است. یعنی وقتی یک فوتون[٥] (بسته انرژی الکترومغناطیسی) ناپدید می‌شود، در همان زمان یک فوتون مشابه ایجاد می‌گردد. بنابراین هیچ تبادل انرژی بین فوتون فرودی و مولکول رخ نداده و ملکول توسط این رخداد، بدون تغییر می‌ماند. از طرف دیگر، اگر نور به طور غیر کشسان پراکنده شود، در فرکانس‌های متفاوتی نسبت به فرکانس نور فرودی آشکار می‌گردد که طیف رامان یا بریلیون را تشکیل می‌دهد. اثرات متفاوتی از بر هم کنش نور ـ ماده در زمینه‌های مختلفی از طیف سنجی نوری استفاده می‌شود که اثر رامان نمونه‌ای از این بر هم کنش‌ها است [۱]. اثر رامان یک اثر غیرخطی است. اگر در محیط غیرخطی پذیرفتاری مرتبه سوم $\chi^3$ غیر صفر باشد پراکندگی رامان نیز قابل مشاهده است. پراکندگی رامان در هر محیطی (جامد، مایع و گاز) می‌تواند به وجود آید، به طوری که برای اولین بار توسط رامان در الکل مشاهده شد [۲]. اساس این پراکندگی، هم با تئوری کلاسیک الکترودینامیک و هم با تئوری کوانتومی قابل توصیف است. در فرآیند غیر کشسان مانند اثر رامان، فرکانس دو فوتون مساوی نیستند و یک تغییر اساسی در حالت مولکولی

[1] Rayleigh
[2] Mie-Tyndall
[3] C. V. Raman
[4] Brillouin
[5] Photon

به وجود می‌آید. پراکندگی غیر کشسان نور با ماده در زمینه‌های تئوری توسط بریلیون در سال ۱۹۲۲ م. و اسمیکل[1] در سال ۱۹۲۳ م. پیش بینی شد [۱].

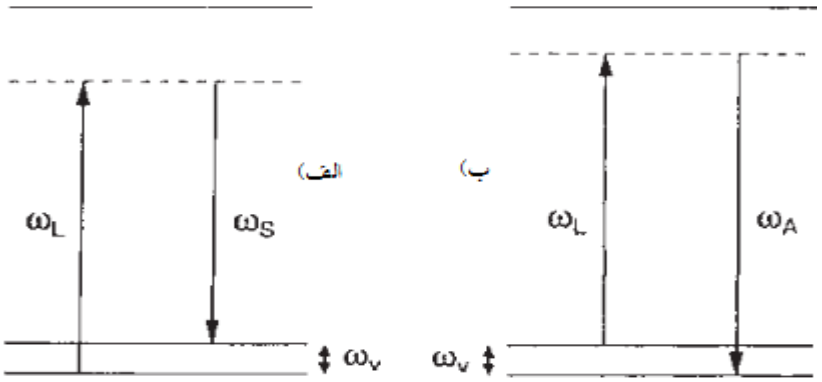
## ۱-۲- اثر خود به خودی رامان[2]

اثر خود به خودی رامان به طور مستقل و همزمان توسط لندسبرگ[3]، مندلستم[4] و رامان در سال ۱۹۲۸ م. مشاهده شد [۲]. ساختار تجربی آن شامل یک چشمه (پرتوی از نور خورشید فیلتر و متمرکز شده)، یک نمونه (حجم زیادی از یک مایع خالص) و یک آشکارساز (چشم انسان) است [۱]. در اثر خود به خودی رامان که توسط رامان در سال ۱۹۲۸ م. کشف شد، یک پرتو نور دارای فرکانس $\omega_l$ با تابیدن به یک ماده که محیط پراکندگی رامان را تشکیل می‌دهد، نور را در فرکانس‌های $\omega_s$ و $\omega_a$ پراکنده می‌کند که به ترتیب اشاره به فرکانس‌های استوکس[5] و آنتی استوکس[6] دارد. وقتی فوتون پراکنده شده، انرژی یا فرکانسی پایین‌تر از فوتون فرودی دارد، جابجایی استوکس گفته می‌شود. همانطور که در شکل (۱-۱) الف دیده می‌شود، فرکانس استوکس $\omega_s = \omega_l - \omega_v$ بوده که $\omega_l$ فرکانس لیزر فرودی و $\omega_v$ فرکانس مدهای ارتعاشی مولکول‌های محیط است. بنابراین، پراکندگی رامان (استوکس)، پراکندگی از حالت پایه محیط به حالت برانگیخته میانی، توسط پراکندگی غیر کشسان دو فوتونی نتیجه می‌شود. برانگیختگی درونی ماده، می‌تواند شامل ایجاد یک حالت الکترونی برانگیخته شده، یک حالت ارتعاشی ـ چرخشی برانگیخته، یک ارتعاش شبکه، یا حرکت اسپین[7] در نیمه رساناها یا امواج الکترون در پلاسماها باشد. این پدیده در گازها، مایعات، جامدات و پلاسماها رخ می‌دهد.

اگر ماده قبلا در حالت برانگیخته باشد (به عنوان مثال توسط برانگیختگی گرمایی) همانند شکل (۱-۱ ب)، بنابراین فوتون پراکنده شده می‌تواند در انرژی یا فرکانس بالاتری $\omega_a = \omega_l + \omega_v$ قرار گیرد، که فوتون آنتی استوکس نامیده می‌شود [۳].

---

[1] Smekal
[2] The Spontaneous Raman Effect
[3] Grigory Landsberg
[4] Leonid Mendelstam
[5] Stokes
[6] Anti-Stokes
[7] Spin Flip




شکل ۱-۱ نمایشی از سطح انرژی برای الف)پراکندگی استوکس رامان ب) پراکندگی آنتی استوکس رامان

## ۱-۳- پراکندگی القایی رامان[1] (SRS)

پراکندگی القایی رامان توسط اکارت و همکارانش[2] (۱۹۶۲) و وودباری و ان جی[3] (۱۹۶۷)کشف و تشریح گردید. ویژگی‌های پراکندگی القایی رامان توسط بلوم برگن[4] (۱۹۶۷)، کایرزومایر[5](۱۹۷۲)، پنزکوپر و همکارانش[6] (۱۹۷۹)، رایمروالمزلی[7](۱۹۹۰)بررسی گردید [۴]. در پراکندگی رامان القایی هر دو فرکانس‌های نور $\omega_l$ و $\omega_s$ روی محیط فرود می‌آیند، در نتیجه پراکندگی القایی رامان منجر به تقویت فوتون‌های استوکس و همچنین تضعیف موج لیزر فرودی در فرکانس $\omega_l$ می‌شود [۵]. همانطور که اشاره شد، اثر رامان فرآیندی است که برای محیط غیرخطی اتفاق می‌افتد، بدین معنی که قطبش الکتریکی تابع خطی از میدان الکتریکی در نظر گرفته نمی‌شود. ($p = \chi^1 E$) این توصیف میدان‌های نوری و بر هم کنش‌ها، یک ناحیه گسترده ای از اپتیک، به عنوان اپتیک غیرخطی است.

$$P = \chi^1 E + \chi^2 E^2 + \chi^3 E^3 + ... = P^1 + P^2 + P^3 + ... \qquad (۱-۱)$$

وودباری مشاهده کرد که با استفاده از یک لیزر با شدت زیاد به عنوان پمپ، پدیده گسیل القایی در محیط غیرخطی اتفاق می‌افتد و موج با فرکانس کمتر سریعا تقویت شده و حدود ده درصد از انرژی پمپ به آن منتقل می‌شود. از آن به بعد گسیل القایی رامان در محیط‌های مختلف مورد

[1] Stimulated Raman Scattering
[2] Eckhart
[3] Woodbury and Ng
[4] Bloembergen
[5] Kaiser and Maier
[6] Penzkofer
[7] Raymer and Walmsley

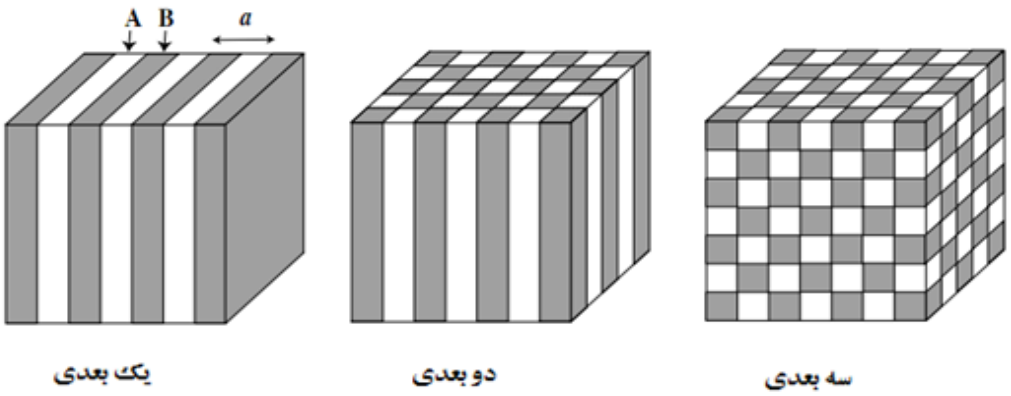
مطالعه و بررسی قرار گرفت [۶]. یکی از محیط‌هایی که در آن پراکندگی رامان اتفاق می‌افتد، شیشه است. در این ماده به دلیل وجود تقارن در مولکول $SiO_2$، پذیرفتاری مرتبه‌ی دوم $\chi^2$ صفر است و آثار غیرخطی فقط مربوط به هارمونیک سوم است. پراکندگی رامان همچنین در ارتباطات نوری و مهندسی اپتیک نیز استفاده می‌شود. اثر رامان یک ابزار قوی برای طیف سنجی نوری است. پس از گذشت هشت دهه روش‌های طیف سنجی، به طور موفقیت آمیزی ازآن برای شناسایی ترکیبات و ساختار فیزیکی، شیمیایی و زیستی عناصر استفاده می‌کنند. با اختراع لیزرها، کاربرد عملی پراکندگی القایی رامان امکان پذیر گردید. از آن به بعد پراکندگی القایی رامان، برای مبدل‌های فرکانسی پر بازده و لیزرهای فیبر فشرده استفاده می‌شود. این پدیده برانگیختگی، می‌تواند حالت‌های کوانتومی در سیستم‌های ملکولی و اتمی را ایجاد کند و اجازه تولید تابش پهنای باند را بدهد [۷].

## ۱-۴- بلور فوتونی[1]

خواص نوری ساختارهای متناوب در سراسر جهان طبیعت، از یک سنگ اُپال گرفته تا طرح‌های روی بال‌های پروانه، قابل رؤیت است. میلیون‌ها سال است که بلورهای فوتونی در طبیعت استخراج می‌شوند. در ۵۰ سال گذشته تکنولوژی نیمه رساناها، نقش مهمی را در هر جنبه‌ای از زندگی روزمره ایفا می‌کند. حرکت به سمت کوچک کردن ابعاد و افزایش سرعت مدارات الکترونیکی، تلاش‌های قابل توجهی را در سرتاسر دنیا برای تحقیق در این زمینه بر انگیخته است. لذا دانشمندان برای انتقال اطلاعات، در تلاش برای فرآیندی دارای بالاترین عملکرد و مایل به استفاده از نور به جای الکترون هستند . نور چندین برتری نسبت به الکترون دارد. از جمله اینکه نور با سرعت خیلی بیشتر از سرعت الکترون که در سیم فلزی حرکت می‌کند، در محیط دی‌الکتریک انتقال می‌یابد. همچنین پهنای باند مواد دی‌الکتریک، اساسا بزرگتر از فلزات است. به علاوه شدت بر هم کنش ذرات نور (فوتون‌ها) همانند الکترون‌ها نیست، که این خود باعث کاهش تلفات انرژی می‌شود. سیستم‌های تماما نوری، هم اکنون مورد توجه بسیاری از محققین هستند. بعضی از مدارهای ترکیبی الکترونیک نوری، عملکرد بسیار بهتری نسبت به مدارهای الکترونیکی مشابه دارند، اما مشکلات در طراحی ادوات نوری همانند ترانزیستورهای الکترونیکی مانع از پیشرفت سیستم‌های تماما نوری شده است که منجر به پیدایش یک دسته از مواد با عنوان بلورهای فوتونی شده است [۸]. بلورهای فوتونی موادی هستند که بر خلاف بلورهای طبیعی، مانند نیمه رساناها به صورت

[1] Photonic Crystal

آماده وجود ندارند، بلکه موادی مصنوعی هستند که به صورت ترکیبی متناوب از مواد دارای ضرایب دی‌الکتریک متفاوت می‌باشند. این نوع از بلورها در سال‌های اخیر بسیار مورد توجه بوده‌اند. همانطور که در شکل (۱-۲) مشاهده می‌کنید بلورهای فوتونی اساسا به سه دسته تقسیم بندی می‌شوند: یک بعدی ($1D$)، دو بعدی ($2D$) و سه بعدی ($3D$).




شکل ۱-۲ نمایشی از بلورهای فوتونی یک، دو و سه بعدی. $a$ ثابت شبکه [۹].

در شکل (۱-۲) $a$ ثابت شبکه و یا دوره تناوب فضایی، نامیده می‌شود و نمایانگر حداقل طول فضایی که ساختار شبکه در آن تکرار می‌شود. به بیان دیگر $\varepsilon(x)=\varepsilon(x+a)$ که در آن $\varepsilon(\cdot)$ تابع متناوب گذردهی الکتریکی است [۱۰]. ثابت شبکه بلورهای فوتونی، قابل مقایسه با بلورهای متشکل از آرایه منظمی از اتم‌ها (نیمه رساناها) است. در واقع مفاهیم اساسی مشترکی برای هر دو بلورها وجود دارد. یکی از بزرگترین تفاوت‌های بین آن‌ها، مقیاس ثابت شبکه است. در بلورهای معمولی ثابت شبکه مرتبه آنگستروم[1]، در حالی که در بلور فوتونی، ثابت شبکه مرتبه‌ای از طول موج الکترومغناطیسی است، مثلا برای نور مرئی حدوداً $1\mu m$ و برای ماکروویو[2] $1cm$ می‌باشد. بلورهای فوتونی که در نواحی ماکروویو و مادون قرمز[3] هستند نسبتا به آسانی ساخته می‌شوند، در حالی که بلورهایی که در ناحیه مرئی کار می‌کنند، مخصوصا سه بعدی ها به دلیل کوچک بودن ثابت شبکه، ساخت آن‌ها مشکل است [۹]. در حالت کلی فوتون‌های نوری تحت تاثیر بازتاب داخلی کلی هستند. از نظر فیزیکی به بیان ساده، می‌توان گفت که موج در هنگام پیشروی در محیط ناهمگن کم کم منعکس می‌شود، در بازه‌ی بسامد خاصی بین امواج تابنده و بازتاب تداخل

[1] Angstroms
[2] Microwave
[3] Far-infrared

سازنده رخ می‌دهد، در نتیجه انتشار موج تداوم می‌یابد، در این حالت بسامد در نوار مجاز قرار دارد. در مقابل وقتی بین امواج تابنده و بازتاب تداخل مخرب رخ می‌دهد، موج مجبور به بازتاب کلی گشته و انتشار غیر ممکن می‌گردد که این حالت به گاف فوتونی اشاره دارد [۱۰].
منظور ازگاف فوتونی[1](باند توقف فوتونی) محدوده فرکانسی است که هیچ نوری داخل بلور فوتونی منتشر نمی‌شود. با تغییر دادن پارامترهای فیزیکی نظیر ثابت دی‌الکتریک و یا عرض لایه‌ها، می‌توان یک نقص بلوری ایجاد کرد. نقص[2] در بلورهای فوتونی مشابه ناخالصی در بلورهای نیمه رسانا می‌باشد. همانطور که ورود ناخالصی در بلور کامل یک نیمه رسانا منجر به ایجاد تراز انرژی جایگزیده در نوار ممنوعه انرژی می‌شود. یک نقص و یا یک انحراف از تناوب می‌تواند منجر به حالت‌های فوتونی متمرکز[3] در باند شود که شکل و خصوصیات آن بستگی به شکل نقص دارد. نقص نقطه‌ای مانند کاواک، نقص خطی مانند موجبر و نقص صفحه‌ای همانند آینه عمل می‌کند.
از دیدگاه تئوری توصیف انتشار نور در بلورهای فوتونی، توسط معادلات ماکسول در یک محیط دی‌الکتریک متناوب صورت می‌گیرد. این بدان معنی است که محاسبات تئوری می‌تواند توصیف دقیقی از چگونگی انتشار فوتون‌ها ارائه دهد و برای بررسی‌های تجربی بسیار مفید است [۸ و۱۱].

کاربرد بلورهای فوتونی در طول دهه گذشته در حال گسترش بوده است. جالب‌ترین و مهم‌ترین کاربرد بلورهای فوتونی را می‌توان در مخابرات فیبر نوری نام برد. ویژگی منحصر به فرد بلورهای فوتونی در انعکاس کامل نور هنگامی که فرکانس آن در گاف فوتونی قرار دارد، امکان کاهش تلفات در غلاف[4] فیبر را به طور چشمگیری افزایش می‌دهد. همچنین لزومی ندارد که نور در دی‌الکتریک انتشار یابد، می‌توان در واقع نور را در داخل خلا یا هوا با فشار کم هدایت نمود که در این صورت اثرات غیرخطی و تلفات فیبر به حد بسیار ناچیزی می‌رسد. از آن جایی که امکان طراحی مناسب نمودار پاشندگی همزمان با طراحی فیبر بلور فوتونی وجود دارد، عملاً می‌توان اثرات اتلاف، تغییرات قطبش و اثرات غیرخطی را به حدی کاهش داد که مخابرات فیبر نوری بین هر دو نقطه از سطح کره زمین بدون احتیاج به تقویت‌کننده یا تکرارساز میسر گردد [۱۰].

[1] Photonic Band Gap
[2] Defect
[3] Localized Photonic State
[4] Cladding

## ۱-۵- سیستم ارتباطات نوری [1]

استفاده از نور برای انتقال اطلاعات از یک مکان به مکانی دیگر، روشی خیلی قدیمی است. در سال ۸۰۰ قبل از میلاد، یونانی‌ها از سیگنال‌های دود آتش برای فرستادن اطلاعاتی شبیه پیروزی در جنگ، در برابر دشمن و درخواست کمک استفاده می‌کردند. در قرن دوم قبل از میلاد، سیگنال‌های نوری با استفاده از لامپ‌های علامت‌دهی به منظور فرستادن هر پیغامی، رمزدهی می‌شدند. سرعت اتصال ارتباطات نوری به دلیل نیاز به خط مسیرهای انتقالی دید که توسط اثرات اتمسفری مانند باران و مه و.. تحت تاثیر قرار می‌گرفت، محدود شده بود. در سال ۱۷۹۱ م. چاپی[2] از فرانسه مخابره‌ای برای ارتباطات از راه دور روی زمین ایجاد کرد. اما او با انتقال اطلاعات محدود مواجه بود. در سال ۱۸۳۵ م. مورس[3]، تلگراف را اختراع کرد و عصر ارتباطات الکتریکی در سراسر جهان شروع شد. استفاده از کابل‌های سیم برای انتقال سیگنال‌های رمز داده شده مورس، در ۱۸۴۴ م. اجرا شد. در ۱۸۷۲ م. الکساندر گراهام بل[4]، فوتوتلفن[5] را با دریچه‌ای که صوت را حول مسافت ۲۰۰ متر انتقال می‌داد، پیشنهاد کرد. اما در مدت چهار سال گراهام بل، فوتو تلفن را به تلفن با استفاده از جریانی برای انتقال سیگنال‌های صوتی تغییر داد. در ۱۸۷۸ م. اولین مکالمه تلفنی برقرار شد. در این بین، هرتز[6] امواج رادیو را در ۱۸۸۷ م. کشف کرد. در ۱۸۹۵ م. مارکونی[7] ارتباط رادیویی را بدون استفاده از سیم‌ها نشان دادکه با استفاده از روش‌های مدولاسیون، سیگنال‌ها همانند حامل‌ها، حول مسافت طولانی با استفاده از امواج رادیویی و میکروموجی ، انتقال داده شدند. عصر جدیدی در ارتباطات نوری بعد از اختراع لیزر توسط میمن[8] از سال ۱۹۶۰ م. شروع شد. از لیزر با یک چشمه همدوس که بالاترین شدت، تک رنگی و جهت‌گیری را با کمترین واگرایی دارد، به عنوان امواج قادر به حمل مقادیر زیادی اطلاعات در مقایسه با امواج رادیو و میکروموج‌ها استفاده شد [۱۲].

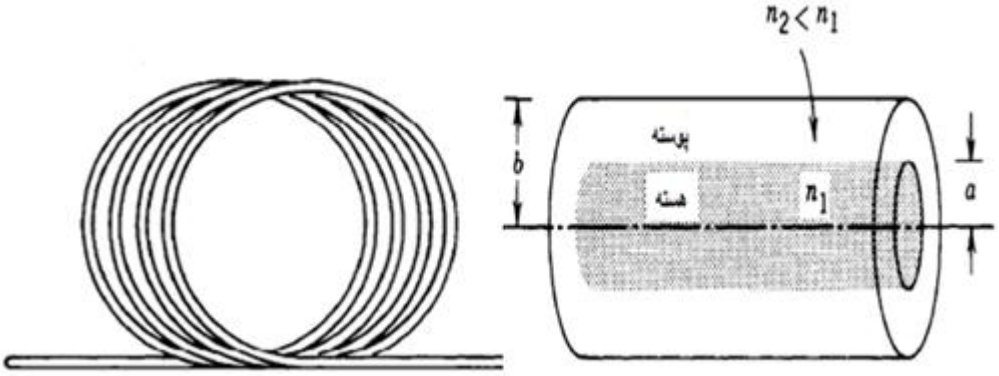
در ۱۹۷۰ م. اولین ارتباطات فیبر نوری گسترش یافت، که این ارتباطات به دلیل مزیت‌های آن نسبت به انتقال الکتریکی، جایگزین ارتباطات سیم مسی شده است. فیبرهای نوری[9]، یکی از

---

[1] Optical Communication
[2] Chappe
[3] Samuel Morse
[4] Alexander Graham Bell
[5] Photo Phone
[6] Hertz
[7] Marconi
[8] Maiman
[9] Fiber Optic

موفقیت‌های قرن بیستم است و به عنوان ابزار مفیدی برای ارسال اطلاعات از یک مکان به مکان دیگر، استفاده می‌شود. فیبرهای نوری تک مد معمولی که اطلاعات را به شکل پالس‌های نوری کوتاه حول فواصل طولانی در بالاترین سرعت‌ها انتقال می‌دهد، جزء مهم و لازمی از زندگی در عصر ارتباطات شده‌اند [۱۳]. هیچ شکی نیست که تکنولوژی اطلاعات یک رشد استثنایی در بین سیستم‌های ارتباطاتی جدید داشته است. مخصوصاً ارتباطات فیبر نوری یک نقش حیاتی در پیشرفت با بالاترین کیفیت و بالاترین سرعت سیستم‌های ارتباطاتی ایفا می‌کند. امروزه فیبرهای نوری فقط در ارتباطات راه دور استفاده نمی‌شود، بلکه در شبکه‌های اینترنیت و شبکه‌های محلی[1] ($LAN$) برای دستیابی به بالاترین نرخ سیگنال‌دهی استفاده می‌شوند.

همانطور که در شکل (۱-۳) مشاهده می‌شود، فیبر نوری موجبر دی‌الکتریک استوانه‌ای شکلی است که از موادی با پایین‌ترین اتلاف مانند شیشه سیلیکا ساخته شده است و شامل یک هسته[2] مرکزی که نور در آن هدایت می‌شود و غلافی[3] با ضریب شکست کمی پایین‌تر می‌باشد. پرتوهای نور روی مرز هسته ـ پوسته در زوایایی بزرگتر از زاویه بحرانی[4]، بازتاب داخلی کلی را تجربه می‌کنند و از طریق هسته بدون شکست هدایت می‌شوند [۱۴].




شکل ۱-۳ فیبر نوری موجبر دی الکتریک استوانه‌ای است.

[1] Local Area Networks
[2] Core
[3] Cladding
[4] Critical Angle

## ۱-۶- فیبر بلور فوتونی[1] (PCF)

فیبرهای بلور فوتونی معمولا فقط از یک نوع ماده ساخته می‌شوند، یعنی یک استوانه شیشه‌ای با آرایه متناوبی از سوراخ‌های هوا که به صورت استوانه‌هایی موازی با محور استوانه اصلی و در اطراف هسته می‌باشند و این سوراخ‌های هوا در طول فیبر امتداد دارند. این فیبرها مثل فیبرهای معمولی دارای هسته و غلاف هستند. بعضی از فیبرها دارای هسته توپر از جنس سیلیکا و یا دارای هسته هوایی هستند و غلاف آن‌ها از شبکه‌های بلور فوتونی تشکیل شده است. فیبرهای بلور فوتونی که همچنین فیبرهای نوری میکرو ساخته شده[2] نیز نامیده می‌شوند، می‌توانند برطبق اینکه برای محبوس سازی نور از ضریب هدایت یا باند توقف استفاده کنند و یا اینکه تناوب ساختار یک بعدی یا دو بعدی باشد، به طبقات گسترده‌ای تقسیم بندی شوند. فیبرهای باند توقف فوتونی، نور را با استفاده از باند توقف نسبت به ضریب هدایت محدود می‌کنند. محدویت باند توقف قابل توجه است، زیرا به نور اجازه عبور درون هسته توخالی را می‌دهد و این باعث کاهش اثرات غیرخطی، اتلاف و خواص نامطلوب دیگر می‌شود. فیبرهای باند توقف فوتونی با تناوب یک بعدی، پوسته‌ای از لایه‌های هم مرکز است که به طور دقیق اولین بار توسط یه [3] در ۱۹۷۸ م. ارائه شد که آن‌ها را فیبرهای براگ[4] نامید. ولی در فیبرهای دیگری از شبکه بلور فوتونی دو بعدی استفاده می‌شود که در سال ۱۹۹۲ م. توسط راسل[5] ساخته شد. اولین فیبر بلور فوتونی در سال ۱۹۹۶ م. در کنفرانس فیبر نوری گزارش شد. اولین اثبات تجربی فیبر بلور فوتونی توسط نایت [6] و گروهش در سال ۱۹۹۸ م. انجام شد و عملا نشان دادند که گاف فوتونی غلاف (پوسته)، می‌تواند عامل هدایت نور در هسته این نوع فیبر باشد [۱۱].

امروزه کاربرد فیبرهای بلور فوتونی در مخابرات نوری به فراوانی یافت می‌شود. پاشندگی یکی از عامل‌های مهم ارسال اطلاعات در سیستم‌های مخابرات نوری پر ظرفیت است، که منجر به پهن شدگی پالس در حوزه زمان می‌شود [۱۵]. همانطوری که اشاره شد، پدیده رامان غیرخطی توسط رامان در ۱۹۲۸ م. مشاهده شد، همچنین پراکندگی القایی رامان در فیبر شیشه‌ای در ۱۹۷۱ م. توسط استولن و گروهش[7] و گروه مشابهی در ۱۹۷۲ م. بهره رامان را در فیبر تک مد اندازه گیری

[1] Photonic Crystal Fibers
[2] Microstructured Optical Fibers
[3] Yee
[4] Bragg Fibers.
[5] P. Russell
[6] Knight et al
[7] Stolen et al.

کردند. پراکندگی القایی رامان، یک پدیده غیرخطی مهم است که ناشی از بر هم کنش پرتو نور قوی (معمولا پمپ) با مدهای ارتعاشی ملکول‌های فیبر سیلیکا، وقتی بالاترین توان پمپ درون فیبر منتشر می‌شود، می‌باشد. فیبر بلور فوتونی زمینه‌ای برای پیشرفت ابزار مبنی بر اثر رامان را فراهم می‌کند. برتری این تکنولوژی، این است که طول فیبر و توان مورد نیاز را کاهش می‌دهد. یوسف و گروهش[1] اولین نتایج اساسی را در فیبرهای بلور فوتونی برای تقویت‌کننده رامان و برای تعدیل‌کننده‌های رامان نوری بیان کرد. فوچی و گروهش[2] تحلیلی از خواص رامان در فیبرهای بلور فوتونی مثلثی را گزارش داد. او همچنین چگونگی حضور ژرمانیم در هسته که می‌تواند در ویژگی‌های رامان تاثیر بگذارد را بررسی کرد. بوتاکینی و گروهش[3] یک مدل تقویت‌کننده فیبر بلور فوتونی را گسترش دادند و در نهایت پراکندگی القایی رامان در فیبر بلور فوتونی هسته اتانول، توسط یو[4] اثبات شد. این روش جدید فیبر بلور فوتونی با اتانول یا با هر مایع دیگری پیشرفت‌های جدیدی را برای خواص غیرخطی پراکندگی رامان با کاربردهایش در ارتباطات نوری و حسگرها فراهم می‌کند [۱۶].

در این پایان نامه، هدف بررسی عوامل موثر بر رابطه پاشندگی در پراکندگی رامان القایی برای فیبر بلور فوتونی است، که در ادامه به بررسی هر کدام از مفاهیم پرداخته شده است. فیبر بلور فوتونی مورد نظراز جنس $SiO_2$ انتخاب شده است. در فصل دوم به توضیحاتی راجع به اپتیک غیرخطی، پراکندگی نور و به عنوان نمونه ای از محیط غیرخطی، به بررسی پراکندگی رامان و در فصل سوم به توضیحاتی راجع به بلور فوتونی، فیبر نوری و انواع آن و در انتهای فصل سوم به فیبرهای بلور فوتونی که از ترکیب خواص بلورهای فوتونی و فیبرهای نوری به وجود می‌آیند و خواص قابل توجهی دارند، پرداخته شده است. در فصل چهارم اثر پراکندگی رامان القایی، در فیبر بلور فوتونی مورد بررسی قرار گرفت که در اینجا، میدان نوری که به مولکول تابانده می‌شود، خود شامل سه جمله می‌باشد و نتایج بدست آمده از فرمول‌ها با نمودارهای پذیرفتاری رامان بر حسب فرکانس استوکس، مقایسه شده و تطابقی بین آن‌ها مشاهده شده است.

[1] Yusoff et al
[2] Fuochi et al
[3] Bottaccini et al
[4] Yiou et al.

# فصل دوم

# پراکندگی