

الف



پایان نامه کارشناسی ارشد در رشته مهندسی برق – الکترونیک

**تحلیل و شبیه سازی سیستم انتقال سیگنال های DWDM با بکارگیری
تقویت کننده های نوری نیمه هادی بهینه شده چند طبقه**

۱	چکیده
۲	فصل اول : کلیات و مبانی نظری تحقیق
۲	۱-۱ مقدمه
۶	۲-۱ طرح موضوع
۸	۳-۱ بیان مسئله و ضرورت انجام پژوهش
۹	۴-۱ سوالات و فرضیه‌های پیش رو
۹	۵-۱ اهداف پژوهش
۱۱	فصل دوم : مبانی کاربردی و پیشینه طرح
۱۱	۱-۲ مقدمه
۱۲	۲-۲ انواع تقویت کننده‌های نوری
۱۲	۱-۲-۲ تقویت کننده‌های فیبر نوری (FOA)
۱۲	۱-۱-۲-۲ تقویت کننده فیبر آلایش شده با عناصر خاکی کمیاب
۱۳	۲-۱-۲-۲ تقویت کننده رامان
۱۶	۳-۱-۲-۲ تقویت کننده فیبر بریلوئن
۱۶	۲-۲-۲ تقویت کننده‌های نوری نیمه هادی (SOA)
۱۸	۱-۲-۲-۲ تقویت کننده‌های نوری نیمه‌هادی فابری- پروت (FP)
۲۰	۲-۲-۲-۲ تقویت کننده‌های نوری نیمه‌هادی موج‌رونده (TW)
۲۱	۳-۲ آنالیز بهره و نویز در تقویت کننده‌های نوری
۲۲	۱-۳-۲ طیف و پهنای باند بهره در تقویت کننده‌های نوری
۲۴	۲-۳-۲ اشباع بهره در تقویت کننده‌های نوری
۲۶	۳-۳-۲ تحلیل نویز در تقویت کننده‌های نوری
۲۷	۴-۲ تحلیل بهره و انتشار نویز در تقویت کننده‌های نوری نیمه هادی
۲۷	۱-۴-۲ آنالیز بهره در تقویت کننده‌های نوری نیمه هادی
۳۰	۲-۴-۲ تحلیل تقویت کننده‌های نوری نیمه هادی از نقطه نظر انتشار نویز

۳۰	۲-۴-۱ تحلیل توان نویز انتشاری و نویز تقویت کننده
۳۱	۲-۴-۲ بررسی نویز فیگر در تقویت کننده‌های نوری نیمه هادی
۳۱	۲-۵ مقایسهٔ اجمالی خصوصیات انواع تقویت کننده‌های نوری
۳۳	۲-۶ بررسی و تحلیل پژوهش‌ها و نوشتارهای پیشین در ارتباط با موضوع
۳۴	۲-۶-۱ اثرات غیرخطی در تقویت کننده‌های نوری
۳۴	۲-۶-۱-۱ اشباع بهره
۳۴	۲-۶-۱-۲ میکس چهار موجی و مدولاسیون بهرهٔ متقابل
۳۵	۲-۶-۱-۳ حساسیت به قطبش در تقویت کننده‌های نوری نیمه هادی
۳۶	۲-۶-۱-۴ نویز فاز در تقویت کننده‌های نوری نیمه هادی
۳۶	۲-۶-۲ بهره و پهنای باند تقویت کننده‌های نوری
۳۷	۲-۶-۳ بکارگیری تقویت کننده‌های (SOA) در سیستمهای مخابراتی دوربرد
۳۹	۲-۶-۴ حساسیت گیرنده‌های نوری با تقویت کننده‌های نوری نیمه هادی
۴۰	۲-۶-۵ بکارگیری تقویت کننده‌های نوری نیمه‌هادی در شبکه‌های نوری
۴۱	۲-۶-۶ چیدمان تقویت کننده‌های نوری در شبکه‌های نوری
۴۲	۲-۷ گزینش حوزهٔ پژوهش
۴۴	فصل سوم : مواد و روش‌ها
۴۴	۳-۱ مقدمه
۴۵	۳-۲ ساختار تقویت کنندهٔ نوری نیمه هادی مورد نظر
۴۶	۳-۳ تحلیل تقویت کننده‌های نوری نیمه هادی در برخورد با سیگنال نوری
۴۷	۳-۳-۱ تحلیل استاتیک تقویت کننده
۵۰	۳-۳-۲ تحلیل تقویت کننده از نقطه نظر تغییرات چگالی حامل
۵۲	۳-۴ مدل تقویت کنندهٔ نوری نیمه هادی
۵۴	۳-۵ ارزیابی پاسخ مدل تقویت کنندهٔ نوری نیمه هادی ارائه شده
۵۵	۳-۶ بکارگیری مدل تقویت کنندهٔ نوری نیمه هادی در سیستم مخابرات نوری DWDM
۵۷	۳-۷ چشم انداز پژوهش

۵۸	فصل چهارم : تجزیه و تحلیل و بیان نتایج حاصل از شبیه سازی تقویت کننده و سیستم
۵۸	۱-۴ مقدمه
۵۸	۲-۴ ارزیابی اعتبار مدل ارائه شده برای تقویت کننده نوری نیمه هادی
۶۰	۳-۴ تحلیل و ارزیابی نتایج حاصل از شبیه سازی رفتار تقویت کننده
۶۱	۱-۳-۴ بهینه سازی بر اساس تغییرات جریان بایاس تقویت کننده
۶۵	۲-۳-۴ بررسی و تحلیل اثر تغییر ضریب تحدید نوری بر ضریب تقویت و نویز انتشاری
۶۷	۳-۳-۴ بررسی و تحلیل اثر تغییر طول ناحیه فعال بر ضریب تقویت و نویز انتشاری
۷۰	۴-۳-۴ بررسی و تحلیل اثر تغییر ضخامت لایه فعال بر ضریب تقویت و نویز انتشاری
۷۲	۵-۳-۴ بررسی و تحلیل اثر تغییر عرض محیط فعال بر ضریب تقویت و نویز انتشاری تقویت کننده
۷۴	۶-۳-۴ خلاصه ای از تاثیر تغییر پارامترهای مختلف بر ضریب تقویت و نویز انتشاری
۷۵	۴-۴ تحلیل و بررسی مشخصه نویزی و بهره نوری در SOA ارائه شده
۷۵	۱-۴-۴ مشخصه نویزی مدل تقویت کننده نوری نیمه هادی ارائه شده
۷۷	۲-۴-۴ مشخصه بهره نوری مدل تقویت کننده نوری نیمه هادی ارائه شده
۷۸	۵-۴ بررسی تداخل کانالی القا شده توسط SOA در سیستمهای DWDM
۸۴	۶-۴ بکارگیری مدل تقویت کننده نوری نیمه هادی ارائه شده در سیستم انتقال DWDM
۸۵	۱-۶-۴ شبیه سازی، ارزیابی و تحلیل عملکرد سیستم انتقال تا فاصله انتقال ۷۳/۵ کیلومتر
۹۳	۲-۶-۴ شبیه سازی، ارزیابی و تحلیل عملکرد سیستم انتقال تا فاصله انتقال ۴۱۹۰ کیلومتر
۱۰۴	فصل پنجم : بحث، تفسیر، نتیجه گیری و جمع بندی
۱۰۴	۱-۵ مقدمه
۱۰۷	۲-۵ چکیده ای از روند پژوهش حاضر و بیان کیفی نتایج
۱۱۲	فهرست منابع و مراجع
۱۱۵	چکیده انگلیسی

فهرست شکل ها و منحنی ها

- شکل ۱-۱ : کاربردهای متداول تقویت کننده‌های نوری ۷
- شکل ۱-۲ : دیاگرام انرژی برای سطوح مختلف در تقویت کننده‌های فیبر آلایش شده ۱۳
- شکل ۲-۲ : شمای یک تقویت کننده فیبر آلایش شده با اِربیم (EDFA) ۱۳
- شکل ۳-۲ : وارونگی جمعیت در تقویت کننده رامان ۱۴
- شکل ۴-۲ : سطوح انرژی در حین فرآیند رامان تحریک شده ۱۶
- شکل ۵-۲ : تعامل نور و ماده در محیط تقویت کننده نوری ۱۷
- شکل ۶-۲ : روشهای پوشاندن سطوح بازتابش ۲۱
- شکل ۷-۲ : ضریب بهره نرمالیزه به ازای عدم تنظیم فرکانس ۲۵
- شکل ۸-۲ : بهره نرمالیزه خروجی به ازای توان نرمالیزه خروجی ۲۵
- شکل ۱-۳ : ساختار بنیادی یک تقویت کننده نوری نیمه هادی موج رونده ۴۵
- شکل ۲-۳ : سیستم مورد استفاده برای ارزیابی پاسخ تقویت کننده نوری نیمه هادی ۵۴
- شکل ۳-۳ : مدل ارائه شده برای بکارگیری تقویت کننده نوری نیمه هادی در سیستم انتقال DWDM ۵۶
- شکل ۱-۴ : منحنی ضریب تقویت به ازای توان ورودی برای پارامترهای ارائه شده در پژوهش [۲۵] ۵۹

- شکل ۴-۲: منحنی تغییرات ضریب تقویت به ازای توان ورودی برای پنج جریان بایاس مختلف ۶۱
- شکل ۴-۳: منحنی تغییرات توان نویز انتشاری به ازای تغییرات توان ورودی تقویت کننده ۶۲
- شکل ۴-۴: منحنی تغییرات ضریب تقویت به ازای تغییرات توان خروجی ۶۴
- شکل ۴-۵: منحنی تاثیرات تغییر ضریب تحدید نوری بر بهره و نویز تقویت کننده ۶۶
- شکل ۴-۶: منحنی تاثیر تغییرات طول تقویت کننده نوری نیمه هادی بر بهره و نویز تقویت کننده ۶۸
- شکل ۴-۷: منحنی تاثیر تغییرات ضخامت لایه فعال بر بهره و نویز تقویت کننده ۷۱
- شکل ۴-۸: منحنی تاثیر تغییر عرض محیط فعال بر بهره و نویز تقویت کننده ۷۳
- شکل ۴-۹: تغییرات نویز فیگر به ازای تغییرات توان ورودی در جریانهای بایاس مختلف ۷۶
- شکل ۴-۱۰: منحنی تغییرات بهره نوری تقویت کننده نوری نیمه هادی به ازای تغییرات توان ورودی ۷۸
- شکل ۴-۱۱: مدل ارائه شده برای ارزیابی کراس تاک در سیستم انتقال DWDM دو کاناله ۷۹
- شکل ۴-۱۲: تغییرات کراس تاک به صورت تابعی از تغییرات جریان بایاس تقویت کننده ۸۰
- شکل ۴-۱۳: منحنی تغییرات کراس تاک به ازای تغییرات توان ورودی در سه جریان بایاس مختلف ۸۱
- شکل ۴-۱۴: سیستم ارائه شده برای انتقال سیگنال DWDM با نرخ بیت ۱۰ Gb/s ۸۵
- شکل ۴-۱۵: توان نوری دریافتی برای کانالهای مختلف تا فاصله انتقال ۷۳/۵ کیلومتری ۸۸

شکل ۴-۱۶ : سیستم مورد استفاده برای ارزیابی عملکرد سیستم در انتقال سیگنال DWDM توسط نرم افزار Optisystem

۸۹

شکل ۴-۱۷ : دیاگرام چشمی پیش از فاصله انتقال ۷۳/۵ کیلومتری برای کانال شماره (۶)

۸۹

شکل ۴-۱۸ : دیاگرام چشمی پس از فاصله انتقال ۷۳/۵ کیلومتری برای کانال شماره (۶)

۹۰

شکل ۴-۱۹ : دیاگرام چشمی پس از فاصله انتقال ۷۳/۵ کیلومتری با استفاده از تقویت کننده درون خطی و پیش تقویت کننده در گیرنده

۹۱

شکل ۴-۲۰ : شمای کلی سیستم انتقال ۱۰ کانال DWDM با نرخ بیت ۱۰ Gb/s به فواصل دوربرد

۹۳

شکل ۴-۲۱ : شمای طرح‌های گستره‌ای مورد استفاده برای انتقال سیگنال DWDM

۹۵

شکل ۴-۲۲ : توان دریافتی به ازای تعداد گستره‌ها برای طرح‌های گستره‌ای مختلف تا فاصله انتقال ۴۱۹۰ کیلومتر

۹۸

شکل ۴-۲۳ : توان نوری دریافتی به ازای تعداد کانالها برای طرح‌های گستره‌ای متفاوت تا فاصله انتقال ۴۱۹۰ کیلومتر

۱۰۰

شکل ۴-۲۴ : دیاگرام چشمی برای قبل و بعد از فاصله انتقال ۴۱۹۰ کیلومتر

۱۰۱

شکل ۴-۲۵ : طیف توان نوری برای قبل و بعد از فاصله انتقال ۴۱۹۰ کیلومتر

۱۰۲

فهرست جداول

- جدول ۱-۲ : مقایسه انواع تقویت کننده‌های نوری ۳۲
- جدول ۲-۲ : روند افزایش فاصله انتقال با استفاده از تقویت کننده‌های نوری ۴۲
- جدول ۱-۳ : پارامترهای ساختاری تقویت کننده‌های نوری نیمه هادی ۴۷
- جدول ۲-۳ : پارامترهای مورد استفاده در شبیه سازی تقویت کننده‌های نوری نیمه هادی ۵۳
- جدول ۱-۴ : چکیده‌ای از تاثیر تغییر پارامترهای مختلف بر ضریب تقویت و توان نویز انتشاری ۷۵
- جدول ۲-۴ : مقایسه کیفی پارامترهای مورد استفاده و بهینه شده در پژوهش [۲۵] و رساله حاضر ۸۲
- جدول ۳-۴ : مقایسه نتایج حاصل از شبیه سازی تقویت کننده در این رساله و پژوهش [۲۵] ۸۳
- جدول ۴-۴ : مقایسه نتایج حاصل از بکارگیری تقویت کننده نوری نیمه هادی در یک گستره ۹۲
- جدول ۵-۴ : مقایسه اجمالی نتایج طرح‌های گستره‌ای مورد استفاده تا فاصله انتقال ۴۱۹۰ کیلومتر ۹۹
- جدول ۶-۴ : نتایج حاصل از شبیه سازی و بکارگیری تقویت کننده در سیستم مخابراتی DWDM ۱۰۳
- جدول ۱-۵ : پارامترهای ساختاری تقویت کننده نوری نیمه هادی مورد استفاده در این رساله ۱۰۸
- جدول ۲-۵ : مقایسه نتایج حاصل از شبیه سازی عملکرد تقویت کننده نوری نیمه هادی ارائه شده در این رساله و پژوهش سینگ و کالر [۲۵] ۱۰۹

جدول ۳-۵: مقایسه نتایج حاصل از بکارگیری تقویت کننده نوری نیمه هادی در یک گستره تقویتی ۱۱۰

جدول ۴-۵: نتایج حاصل از شبیه سازی سیستم DWDM ۱۱۱

چکیده

امروزه در راستای بهره‌وری بیشتر از سیستمهای مخابراتی و کاهش پیچیدگی و هزینه سیستمهای مخابراتی دوربرد، تکنیک مالتی پلکس با تقسیم طول موج (WDM)، جایگزین روشهای قبلی مانند مالتی پلکس با تقسیم زمانی (TDM) شده است. در این روش با تقسیم سیگنال ارسالی به چندین طول موج، می‌توان کانالهای متعددی را از طریق یک فیبرنوری، ارسال نمود.

از طرفی، در تمامی سیستمهای مخابراتی دوربرد، بدلیل وجود افت پیاپی در طول مسیر انتقال، نیازمند تقویت دوره‌ای سیگنال ارسالی می‌باشیم. لذا نیازمند بکارگیری تقویت کننده های نوری پر قدرت و پربازده‌ای می‌باشیم که سیگنال نوری را مستقیماً و بدون تبدیل به حوزه الکتریکی تقویت نمایند. استفاده از این تقویت کننده ها، بازده سیستم انتقال را افزایش داده و هزینه انتقال را به شدت کاهش خواهد داد. در میان گروه عظیم تقویت کننده‌های نوری، تقویت کننده‌های نوری نیمه هادی (SOA) در مقایسه با تقویت کننده‌های فیبر نوری، به علت حجم کم، طیف بهره بسیار وسیع و هموار، مصرف توان اندک، یکپارچگی آسان با دیگر ادوات و هزینه اندک، به عنصری کلیدی برای سیستمهای انتقال فیبرنوری تبدیل شده‌اند. از این رو جهت استفاده به عنوان تقویت کننده درون خطی در سیستمهای مخابراتی دو طرفه، بسیار مناسب می‌باشند.

در این رساله، ابتدا رفتار تقویت کننده‌های نوری نیمه هادی (SOA) را در سیستمهای مخابرات نوری مورد ارزیابی قرار داده و مدلی را برای شبیه سازی عملکرد تقویت کننده ارائه نموده‌ایم. سپس با تحلیل و بررسی مدل ارائه شده، تقویت کننده را بهینه نموده و مشخصه‌های اصلی آن را نظیر بهره و نویز بهبود بخشیده‌ایم. در نهایت با بکارگیری مدل بهینه شده در سیستم مخابرات نوری DWDM، با فرمت مدولاسیون RZ-DPSK با فاصله کانالی ۲۰ گیگاهرتز برای انتقال ۱۰ کانال با نرخ بیت ۱۰ گیگابیت بر ثانیه، با استفاده از گستره‌های تقویتی ۷۳/۵ کیلومتری بهینه شده متشکل از ۶۳ کیلومتر فیبر تک مد (SMF)، ۱۰/۵ کیلومتر فیبر جبران کننده پاشندگی (DCF) و یک تقویت کننده‌های نوری نیمه هادی در انتها و همچنین تقویت کننده های نوری نیمه هادی بهینه شده چند طبقه، رفتار سیستم را تا فاصله انتقال ۴۱۹۰ کیلومتر مورد ارزیابی و تحلیل قرار داده و به نتایج مطلوبی دست یافته‌ایم. نتایج نشان می‌دهد که با بهینه سازی پارامترهای ساختاری تقویت کننده‌های نوری نیمه هادی نظیر جریان بایاس و توان ورودی و چینش مناسب و بهینه گستره‌های تقویتی در طول مسیر انتقال، می‌توان به تقویت مطلوب و نویز کمتری، در سیستم انتقال دست یافت.

فصل اول : مقدمه و کلیات

۱-۱ مقدمه

در طول چند دهه گذشته، مخابرات نوری، علاوه بر اینکه سبک ارتباطات را در جهان ما تغییر داده، تحول عظیمی را نیز در مخابرات بوجود آورده که اساساً هسته مخابرات راه دور، علوم پایه مرتبط با آن، فناوری راه اندازی و صنایع مرتبط را دگرگون نموده است. موجودیت و توسعه مخابرات فیبرنوری وابسته به بکارگیری فیبرهای نوری کم اتلاف، لیزرهای پر قدرت (خصوصاً لیزرهای نیمه هادی پیوندی)، تقویت کننده‌ها و آشکارسازهای نوری است.

با این حال، ۲۵ سال به طول انجامید تا نخستین ایده بکارگیری سیستمهای مخابرات نوری به صورت عملی پیاده سازی شود. این سیستم که در سال ۱۹۸۳ معرفی شد، شهرهای واشنگتن و نیویورک را توسط فیبرنوری به یکدیگر متصل می نمود. پیشرفت قابل توجه دیگر، بکارگیری اولین سیستم انتقال فیبرنوری زیردریایی در امتداد اقیانوس اطلس در سال ۱۹۸۸ میلادی بود. پس از این دستاوردهای برجسته، مخابرات فیبرنوری به شدت نحوه انتقال اطلاعات را تحت تاثیر قرار داده است [۳].

نیازهای روز افزون برای سیستمهای انتقال پر ظرفیت و همچنین قدرتمند شدن کامپیوترها و نیاز به اتصال به یکدیگر، یکی از دلایل اصلی رشد بیش از حد فناوری انتقال فیبرنوری برای اتصال موازی کامپیوترها جهت پردازش اطلاعات و دیگر فناوریهای کلیدی می باشد. این فناوریها با هم ترکیب شده تا نیازهای فزاینده جهانی را برای خدمات اطلاعاتی نظیر اینترنت، دیتا و سرویسهای باند گسترده و همچنین رشد سریع این خدمات، برآورده سازند. گام نوین بعدی در فناوری مخابرات نوری، بکارگیری و توسعه شبکههای نوری است [۲].

از طرف دیگر، تحول اطلاعات، این امر را ایجاب می نماید که شبکههای چند رسانه برای برقراری سرویسهای مخابراتی بلادرنگ، به پهنای باند گستردهای دسترسی داشته باشند. در حال حاضر، فیبرنوری تنها محیط انتقالی است که می تواند چنین پهنای باند وسیعی را بوسیله اتصالات مخابراتی با افت کم ایجاد نماید. یکی از بنیانهای این جامعه اطلاعاتی، مخابرات فیبرنوری با ظرفیت بالاست، که از دهه ۱۹۸۰ میلادی، یکی از پرسرعتترین صنایع از لحاظ رشد بوده و فناوری کلیدی برای برآورده کردن نیازها در زمینه پهنای باند سیستم های پهن باند^۱ است. نخستین فیبرنوری، تضعیف بسیار زیادی در حدود ۱۰۰۰ دسی بل بر کیلومتر داشت و برای بکارگیری در سیستمهای مخابرات فیبرنوری مناسب نبود. اما در سال ۱۹۷۰ میلادی، دانشمندان مؤسسه *Corning Glass Works* موفق به تولید فیبری با ضریب تضعیف ۲۰

دسی‌بل بر کیلومتر گردیدند که این امر، راه‌گشای مخابرات فیبرنوری گردید [۲۳]. امروزه فیبرهایی با ضریب تضعیفی به مراتب کمتر از ۰/۲ دسی‌بل بر کیلومتر در دسترس می‌باشند. پژوهش‌های اخیر در توسعه سیستمهای مخابرات نوری، در راستای افزایش ظرفیت کلی محیط انتقال و طراحی سیستمهای انتقال نوری دوربرد صورت پذیرفته است. که این اهداف، تنها با استفاده از روش مالتی پلکس با تقسیم طول موج^۱ (WDM)، قابل دستیابی است. این روش در مقایسه با روشهای قبلی مانند مالتی پلکس با تقسیم زمانی^۲ (TDM)، برای بهره‌گیری بیشتر از پهنای باند فیبرنوری ارائه شده است. در روش WDM، با قرار دادن هر کانال در طول موجهای متفاوت، چندین کانال را از طریق یک فیبر انتقال می‌دهیم. این امر سبب می‌شود که از القای تداخل بین کانالی در فرآیند مالتی پلکس یا دی مالتی پلکس کردن سیگنال در فیبرنوری جلوگیری شود. سیستم WDM، با فراهم ساختن بستری برای انتقال همزمان سیگنالهای مستقل در یک فیبر، باعث بکارگیری قسمت قابل توجهی از پهنای باند قابل دسترس می‌شود [۳].

در راستای برآورده کردن نیازهای روز افزون برای دستیابی به سیستمهایی با ظرفیت انتقال چندین ترا بیت بر ثانیه، سیستم مالتی پلکس با تقسیم فشرده طول موج (DWDM)، بر پایه سرعت انتقال ۴۰ گیگابیت بر ثانیه، به عنوان نسل بعدی سیستمهای با ظرفیت انتقال بالا معرفی شده است. البته مشکلات زیادی نظیر پاشندگی طول موج، پاشندگی مُد قطبش، اثرات غیرخطی خط انتقال، تداخل خطی و غیر خطی کانال مجاور و افزایش هزینه کنترل سیگنال، فرا روی این سیستم جدید قرار دارد [۲].

با وجود اینکه در فیبرهای نوری افت ذاتی کمی وجود دارد، با این حال، بسیار ضروری است که برای بالا نگه داشتن نسبت سیگنال به نویز و همچنین آشکارسازی سیگنال با نرخ خطای کم در گیرنده، سیگنال نوری را در طول مسیر تقویت نمائیم. همچنین در سیستمهای انتقال دوربرد، نیازمند تقویت و بازتولید سیگنال در طول مسیر هستیم. علاوه بر این، با افزایش پهنای باند، لازم است از ادواتی برای تقویت نور در طول مسیر استفاده کنیم که مستقل از نرخ بیت و انکدینگ سیستم باشند.

برای تقویت سیگنال در طول مسیر، دو روش وجود دارد؛ در روش نخست که با استفاده از تکرار کننده‌های اپتوالکترونیکی انجام می‌گیرد، در فواصل مشخص، سیگنال نوری را به جریان الکتریکی تبدیل کرده، سپس توسط ادوات الکترونیکی، این جریان را تقویت نموده و در نهایت، سیگنال تقویت شده را توسط فرستنده دوباره به نور تبدیل کرده و به داخل فیبر ارسال می‌کنیم. این روش که تقویت و بازتولید نام دارد، در سیستمهای نوری WDM، هم باعث اتلاف توان و پائین آمدن سرعت سیستم و هم باعث افزایش هزینه می‌شود. پس در این سیستم‌ها نیازمند بکارگیری تقویت کننده های نوری می‌باشیم [۱].

1 - Wavelength Division Multiplexing (WDM)

2 - Time Division Multiplexing (TDM)

لذا پیشرفتهای اخیر در مخابرات نوری، تا حد زیادی وابسته به توسعه تقویت کننده‌های نوری پر قدرت و پربازده‌ای می‌باشد، که ضرورت تبدیلات پرهزینه سیگنال‌های نوری به الکتریکی و الکتریکی به نوری را از بین برده و نور را در طول مسیر، مستقیماً تقویت نمایند. اکثر تقویت کننده‌های نوری، سیگنال تابشی ورودی را بوسیله انتشار خودبخودی تقویت می‌کنند. مهمترین فاکتور در این تقویت کننده‌ها طیف بهره می‌باشد و این طیف زمانی بوجود می‌آید که پمپ لیزری حامل‌ها را به داخل محیط، پمپ نماید و عمل وارونگی جمعیت رخ دهد. لذا انتشار خودبخودی حامل‌ها در محیط لیزر باعث تقویت سیگنال و تشکیل طیف بهره می‌شود [۱۳].

این تقویت کننده‌ها در حالت ایده‌آل، نسبت به نرخ بیت، فرمت مدولاسیون، توان و طول موج سیگنال عبوری از خود، حساس نیستند و از همه مهمتر اینکه، بهره را به صورت همزمان برای تمامی کانالها فراهم می‌سازند. لذا از آنجا که تمامی کانال‌ها در مدت زمان انتقال و تقویت، به فرم نوری باقی می‌مانند، سیستم‌های WDM با تقویت کننده‌های نوری، از لحاظ امنیت انتقال دیتا قابل اعتمادتر و از لحاظ هزینه به صرفه‌تر از سیستم‌های بازتولید الکترونیکی هستند [۲].

از این تقویت کننده‌ها همچنین در مدهای غیرخطی نظیر گیت‌های نوری و سوئیچ‌های مسیریابی نیز استفاده می‌شود. عمده‌ترین کاربرد تقویت کننده‌های نوری، تقویت همزمان تمامی کانال‌ها در سیستم‌های نوری WDM است که به چنین عناصری تقویت کننده‌های درون خطی گفته می‌شود. تقویت کننده‌های نوری می‌توانند به طور همزمان، سیگنال را در طول موج‌های متفاوت تقویت نمایند. در سیستم‌های مخابراتی امروزی، تقویت کننده‌های نوری سه کاربرد اساسی دارند [۱، ۲، ۳ و ۱۳]:

الف) تقویت توان، پس از خروج نور از منابع لیزری.

ب) فراهم سازی بازتولید های نوری و تقویت درون خطی در سیستم‌های مخابراتی دوربرد.

ج) استفاده به عنوان پیش تقویت کننده، پیش از گیرنده.

عمدتاً دو نوع تقویت کننده نوری داریم:

- تقویت کننده‌های فیبرنوری^۱ (FOA)

- تقویت کننده‌های نوری نیمه هادی^۲ (SOA).

تقویت کننده‌های فیبرنوری به سه دسته تقسیم می‌شوند:

الف) تقویت کننده‌های ساخته شده توسط عناصر آلایشگر کمیاب که از طریق آلایش هسته فیبر با

یونهای کمیاب نظیر نئودیمیم، پراسئودینیوم و اربیوم ساخته می‌شوند.

ب) تقویت کننده‌های رامان.

1 - Fiber Optic Amplifier (FOA)

2 - Semiconductor Optical Amplifier (SOA)

ج) تقویت کننده‌های بریلوئن. که این دو تقویت کننده، برای تقویت سیگنال به ترتیب مبتنی بر اثرات غیر خطی پراکندگی رامان تحریک شده^۱ (SRS) و پراکندگی بریلوئن تحریک شده^۲ (SBS)، می‌باشند.

تقویت کننده‌های نوری نیمه هادی (SOA)، تا حد زیادی مشابه لیزرهای نیمه هادی هستند. همانطور که می‌دانیم، لیزرهای نیمه هادی دارای محیط بهره و مکانیزم فیدبک نوری هستند که این فیدبک عموماً توسط سطوح برش داده شده جلویی لیزر و یا شبکه بندی مناسب در نزدیکی محیط بهره، ایجاد می‌شود. از این رو، تقویت کننده‌های نوری نیمه هادی، اصولاً نوعی لیزر هستند که سیستم فیدبک را از آن حذف نموده و فقط دارای محیط بهره می‌باشند. بعلاوه، تمام سیستمهای لیزری تا زمانی که به اشباع نرسیده‌اند به عنوان تقویت کننده عمل می‌کنند، لذا لیزرهای نیمه هادی نیز از این قاعده مستثنی نیستند. تحقیقات بر روی تقویت کننده های نوری نیمه هادی پس از اختراع لیزر در سال ۱۹۶۲ شروع شد و در طول دهه ۸۰ میلادی و پس از آن، از کاربردهای بالقوه این تقویت کننده‌ها در سیستمهای انتقال دیتا استفاده شده است. تقویت کننده‌های نوری نیمه هادی نیز به دو دسته تقسیم می‌شوند [۳]:

الف) تقویت کننده‌های نوری نیمه هادی فابری پروت^۳ (FP): این نوع تقویت کننده‌ها دارای بازتابشی در حدود 0.3 (تقریباً کمتر از دیود لیزری)، در سطوح جلویی هستند و به علت داشتن پهنای باند باریک (در حد ۵ تا ۱۰ گیگاهرتز)، و داشتن خواص غیرخطی در محیط بهره و فیدبک اندک از سطوح جلویی، در کاربردهای پردازش نوری سیگنال نظیر تبدیل طول موج و سوئیچینگ نوری مورد استفاده قرار می‌گیرند و برای کاربردهای WDM مناسب نیستند.

ب) تقویت کننده‌های نوری نیمه هادی موج رونده^۴ (TW): این نوع تقویت کننده‌ها را با متوقف کردن مسیر فیدبک انعکاسی از سطوح جلویی لیزر توسط یک لایه پوششی ضد بازتابش تولید می‌کنند. باید در نظر داشت که شدت بازتابش باید به اندازه کافی کاهش یابد تا تقویت کننده به صورت موج رونده عمل نماید (در حد 10^{-3} تا 10^{-4}). علت نامگذاری موج رونده این است که سیگنال تقویت شده فقط در راستای مستقیم در داخل محیط تقویت، حرکت می‌کند. این نوع تقویت کننده‌ها به علت داشتن پهنای باند وسیع (در حد ۴۰ نانومتر)، برای کاربردهای WDM، بسیار مناسب هستند.

تقویت کننده‌های نوری نیمه هادی در مقایسه با تقویت کننده‌های فیبرنوری، به علت حجم کم، طیف بهره بسیار وسیع و هموار، مصرف توان کم، سادگی تطبیق با دیگر ادوات و هزینه اندک، جایگزین مناسبی برای تقویت کننده‌های فیبرنوری در سیستمهای انتقال WDM می‌باشند و به علت داشتن همین خصوصیات به عنصری کلیدی برای تمام شبکه‌های نوری تبدیل شده‌اند.

1 - Stimulated Raman Scattering (SRS)

2 - Stimulated Brillouin Scattering (SBS)

3 - Fabry- Perot Amplifier (FPA)

4 - Travelling-Wave Amplifier (TWA)

تا کنون طرح‌های متنوع و گوناگونی برای انتقال سیگنال‌های WDM و DWDM، به فواصل دوربرد ارائه شده و پژوهش‌های فراوانی نیز در این زمینه صورت گرفته است. مبحث اصلی این طرح‌ها و پژوهش‌ها دو موضوع عمده است، یکی چگونگی انتقال سیگنال و دیگری ادوات مورد نیاز برای تقویت سیگنال در طول مسیر. برای انتقال سیگنال‌های WDM و DWDM، نیازمند آن هستیم که طرح گستره‌ای^۱ را ارائه کنیم تا کار انتقال و تقویت سیگنال را انجام دهد. این طرح‌ها عموماً شامل چند کیلومتر فیبر تک مد^۲، چند کیلومتر فیبر جبران کننده پاشندگی^۳ برای جبران اثرات نامطلوب در سیستم انتقال و ترکیبی از تقویت کننده های نوری نیمه هادی برای تقویت سیگنال می‌باشند. که به هر کدام از این مجموعه‌ها یک گستره گفته می‌شود. لذا تحلیل و بررسی رفتار تقویت کننده‌های نوری نیمه‌هادی، در سیستمهای مخابراتی DWDM دوربرد، از اهمیت بالایی برخوردار است.

یکی از موانع اصلی در سر راه توسعه سیستمهای مخابراتی محدودیت‌های موجود در ملاحظات بهره و نویز به علت افزایش فاصله انتقال خواهد بود. بررسی‌ها نشان می‌دهد که خصوصیات تقویت کننده‌های نوری نیمه هادی و شرایط بایاس و توان ورودی آنها به طور ویژه‌ای بر بهره و نویز سیستم انتقال، تاثیر می‌گذارد. پس مطالعه دقیق این تقویت کننده‌ها و بررسی نحوه شکل گیری گستره‌ها در طول مسیر، گام مؤثری در از بین بردن موانع موجود بر سر راه توسعه سیستم‌های انتقال DWDM خواهد بود [۲۵].

۲-۱ طرح موضوع

همانطور که می‌دانیم، در سیستمهای مخابراتی دوربرد، مهمترین هدف، انتقال سیگنال از فرستنده به گیرنده با کمترین تلفات و بیشترین بهره می‌باشد و همانطور که بیان گردید، در طول مسیر انتقال نیازمند تقویت دوره‌ای سیگنال در طول مسیر خواهیم بود. به علاوه، در سیستمهای مخابرات نوری مالتی پلکس با تقسیم فشرده طول موج (DWDM) نیازمند بکارگیری تقویت کننده‌های نوری پر قدرتی می‌باشیم که نور را در طول مسیر با کمترین تلفات و نویز، تقویت نموده و سیگنال اطلاعات را به بهترین نحو از فرستنده به گیرنده انتقال دهند. در سیستمهای امروزی از تقویت کننده‌های نوری نیمه هادی (SOA) برای تقویت سیگنال استفاده می‌گردد.

لذا نخستین گام این است که بتوانیم تقویت کننده‌های نوری نیمه هادی را برای ارائه عملکردی مناسب در سیستم مخابراتی مورد ارزیابی و تحلیل قرار دهیم تا بتوان این تقویت کننده‌ها را برای افزایش توان و کاهش نویز، بهینه نمود. سپس با بکارگیری این تقویت کننده بهینه شده در سیستم انتقال سیگنال

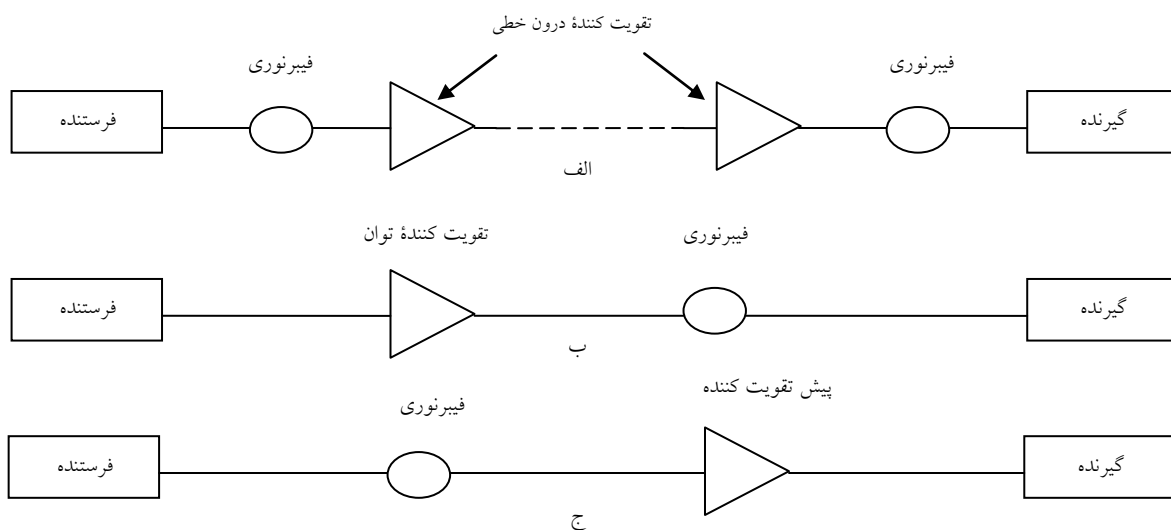
1 - Span Scheme

2 - Single Mode Fiber (SMF)

3 - Dispersion Compensating Fiber (DCF)

DWDM، کارایی کل سیستم را تحت تاثیر قرار داده و عملکرد آن را بهبود بخشیم. لذا تمرکز اصلی این پایان نامه بر روی بهینه سازی تقویت کننده‌های نوری نیمه هادی خواهد بود.

همانطور که در مقدمه بیان گردید، با استفاده از تقویت کننده‌های نوری می‌توان اهداف متعددی را در طراحی سیستمهای مخابرات نوری پیاده سازی نمود. متداولترین کاربردهای تقویت کننده‌های نوری در شکل (۱-۱) نشان داده شده است. حال به توضیح مختصری در ارتباط با چند کاربرد اصلی این تقویت کننده‌ها می‌پردازیم [۳]:



شکل ۱ - ۱: کاربردهای متداول تقویت کننده‌های نوری در سیستمهای نوری:

الف) به عنوان تقویت کننده درون خطی، ب) به عنوان تقویت کننده توان فرستنده و ج) به عنوان پیش تقویت کننده برای گیرنده.

الف) مهمترین کاربرد تقویت کننده‌های نوری در سیستمهای مخابراتی دوربرد، عبارتست از بکارگیری آنها به صورت تقویت کننده‌های درون خطی به عنوان جایگزینی برای تقویت کننده‌های الکتریکی. تعداد زیادی از این تقویت کننده‌ها را می‌توان به صورت یک زنجیره متناوب تا جایی که کارایی سیستم توسط پارامترهایی نظیر اثرات مکرر پراکندگی فیبر، خواص غیرخطی فیبرنوری و نویز تقویت کننده محدود نشود، به یکدیگر متصل نمود. استفاده از تقویت کننده‌های نوری به ویژه برای سیستمهای WDM مدنظر است، زیرا می‌توان تمامی کانالها را به صورت همزمان تقویت نمود.

ب) رویکردی دیگر در استفاده از تقویت کننده‌های نوری، افزایش توان فرستنده با بکارگیری یک تقویت کننده بلافاصله پس از فرستنده است. چنین تقویت کننده‌هایی را تقویت کننده‌های توان یا تشدید کننده‌های توان^۱ می‌نامند، چرا که هدف اصلی آنها تقویت توان ارسالی است. یک تقویت کننده توان با در نظر گرفتن افت فیبر و بهره تقویت کننده می‌تواند فاصله انتقال را تا ۱۰۰ کیلومتر افزایش دهد.

ج) از طرفی فاصله انتقال را می توان با قرار دادن یک تقویت کننده، قبل از گیرنده برای تشدید توان دریافتی افزایش داد. چنین تقویت کننده هایی را پیش تقویت کننده های نوری^۱ می نامند و عموماً برای بهبود حساسیت گیرنده بکار می روند. البته از تقویت کننده های نوری برای کاربردهای دیگری نظیر جبران افت توزیع در شبکه های محلی و کاربردهای ویژه در سیستم های نوری WDM نیز استفاده می شود.

در این رساله، توجه خود را بر روی شبیه سازی رفتار تقویت کننده های نوری نیمه هادی درون خطی معطوف نموده ایم تا بتوان عملکرد تقویت کننده را از لحاظ تقویت سیگنال بهینه نمود که این امر با بهینه سازی جریان بایاس تقویت کننده و پارامترهای داخلی آن، امکان پذیر خواهد بود. سپس در صدد آن هستیم که رفتار تقویت کننده را در سیستم انتقال نشان داده و عملکرد سیستم را نیز بهینه نماییم.

۳-۱ بیان مسئله و ضرورت انجام پژوهش

همانطور که می دانیم هر سیستم مخابراتی از سه بخش اساسی تشکیل شده است، فرستنده، گیرنده و کانال مخابراتی، هدف اصلی این پژوهش نیز در حقیقت بهینه سازی کانال مخابراتی خواهد بود. چرا که وظیفه یک کانال مخابراتی، انتقال سیگنال نوری بدون ایجاد هیچگونه اعوجاجی از فرستنده به گیرنده است. اکثر سیستم های نوری، از فیبرهای نوری به عنوان کانال مخابراتی استفاده می نمایند، زیرا فیبر سیلیسیومی توانایی انتقال سیگنال را با افت بسیار اندک 0.2 دسی بل بر کیلومتر دارد. این بدان معنی است که پس از طی 100 کیلومتر، سیگنال 1% افت خواهد کرد. بدین منظور، تلفات فیبر، یکی از مباحث اصلی در طراحی سیستم های انتقال می باشد، چرا که فاصله تکرار کننده ها و تقویت کننده ها را در سیستم انتقال نوری دوربرد مشخص می نماید. با توجه به مباحث بیان شده در می یابیم که برای دستیابی به سیستم انتقالی با کمترین تلفات می بایست کنترل دقیقی بر روی تقویت کننده های موجود در سیستم انتقال صورت پذیرد. چرا که بهینه سازی این تقویت کننده ها به معنای بهینه سازی کانالی مخابراتی و در نتیجه بهینه سازی کل سیستم خواهد بود.

لذا این امر ضروری است که در نخستین گام، توجه خود را به بررسی و تحلیل این تقویت کننده ها معطوف نموده تا بتوان راهکاری را برای شبیه سازی و بهینه سازی عملکرد تقویت کننده های نوری نیمه هادی درون خطی ارائه کرده و در گام دوم از این تقویت کننده های بهینه شده به صورت چندین طبقه در کانال مخابراتی (مسیر انتقال) به عنوان تقویت کننده پس از چندین کیلومتر انتقال سیگنال استفاده کرده و اثرات بهینه سازی را نشان دهیم تا بتوان کل سیستم انتقال را بهینه نمود.

۴-۱ سوالات و فرضیه‌های پیش رو

حال با توجه به مباحث بیان شده، چند سوال به ذهن می‌رسد، نخست اینکه چگونه می‌توان تقویت کننده‌های نوری نیمه هادی را بهینه نمود؟ دوم اینکه بهینه سازی بر روی چه پارامترهایی مد نظر است؟ سوم اینکه چگونه می‌توان طرحی را برای کاهش افت سیگنال در انتقال سیگنال DWDM به فواصل انتقال دوربرد با استفاده از تقویت کننده‌های نوری نیمه هادی ارائه نمود؟ و سوالاتی از این دست...

بنابراین با بررسی پژوهشهای پیشین، فرضیه‌های زیر را بیان می‌نمائیم که اکثر این موارد در این رساله به اثبات رسیده است:

- ۱- با بهینه سازی و تغییراتی در پارامترهای ساختاری تقویت کننده، نظیر طول و عرض محیط فعال، به همراه تغییراتی در جریان بایاس آن، می‌توان تقویت کننده نوری نیمه هادی را برای عملکرد بهتر از لحاظ تقویت سیگنال و کاهش نویز، بهینه نمود.
- ۲- با راه اندازی تقویت کننده‌های نوری نیمه هادی تا قبل از توان اشباع، می‌توان به بهره مطلوب، نویز کمتر و کارایی بهینه دست یافت.
- ۳- در طول مسیر انتقال می‌توان از یک طرح ثابت، شامل فیبر تک مد و تقویت کننده نوری نیمه هادی برای انتقال و تقویت سیگنال استفاده نمود و این طرح را گسترش داد.
- ۴- می‌توان با تغییر نحوه چیدمان گسترده‌ها در طول مسیر و استفاده از تقویت کننده‌های نوری نیمه هادی پس از چندین گستره و تغییر مکان این تقویت کننده، به طرح گستره‌ای به صورت بهینه دست یافت تا انتقال سیگنال با ضریب بهره بالاتر و نویز کمتری انجام شود و همچنین طرح را برای فواصل دوربرد با همین ضریب توسعه داد.

۵-۱ اهداف پژوهش

از میان گروه گسترده تقویت کننده‌های نوری که تا کنون مورد بحث قرار گرفته‌اند، پژوهنده، تقویت کننده‌های نوری نیمه هادی (SOA) را برمی‌گزیند. زیرا همانطور که بیان شد، تقویت کننده‌های نوری نیمه هادی در مقایسه با تقویت کننده‌های فیبرنوری، به علت حجم کم، طیف بهره بسیار وسیع و هموار، مصرف توان کم، سادگی تطبیق با دیگر ادوات و هزینه اندک، جایگزین مناسبی برای تقویت کننده‌های فیبرنوری در سیستمهای انتقال WDM می‌باشند و به علت داشتن همین خصوصیات به عنصری کلیدی برای تمام شبکه های نوری تبدیل شده‌اند.

از طرف دیگر، در سیستمهای مخابرات نوری دوربرد، تقویت کننده‌های نوری نیمه هادی (SOA) در مقایسه با تقویت کننده‌های فیبر آرایش شده با اربیوم (EDFA) بدلیل بازدهی بیشتر، توجه زیادی را به خود

جلب نموده‌اند. اما مسئله اشباع بهره که ناشی از مدولاسیون بهره متقابل (XGM)، مدولاسیون فاز متقابل (XPM) و میکس چهار موج (FWM) در یک سیستم نوری چند کاناله است، باعث محدود کردن کارایی سیستم شده و علاوه بر این، بکارگیری متوالی SOA برای فواصل انتقال دوربرد میسر نیست. بنابراین نیازمند مطالعه دقیق بر روی نحوه چیدمان صحیح و مناسب تقویت کننده‌های نوری نیمه هادی در سیستمهای مخابرات نوری دوربرد هستیم، تا بتوان اندکی مسئله اشباع بهره را حل کرده و تقویت کننده را بهینه نمود. لذا این پایان نامه بر اهداف زیر متمرکز شده است:

۱- پژوهش بر روی تقویت کننده‌های نوری نیمه هادی (SOA) برای دستیابی به عملکرد بهینه و کاهش تلفات در شبکه‌های مخابرات نوری DWDM.

۲- بهبود توان ارسالی در شبکه های مخابرات نوری DWDM بوسیله چیدمان بهینه گسترده‌ها و تقویت کننده های نوری نیمه هادی.

۳- شبیه سازی، تحلیل و مقایسه نتایج روشهای بهینه سازی تقویت کننده‌های نوری نیمه هادی و نحوه چیدمان گسترده‌ها در شبکه‌های مخابراتی.

در این پژوهش سعی بر آن است تا با توسعه فعالیت‌هایی که تا کنون در این زمینه انجام شده و بررسی خصوصیات تقویت کننده‌های نوری نیمه هادی، به مقادیر بهینه‌ای برای پارامترهای تقویت کننده‌های نوری نیمه هادی دست یابیم، تا توان و نویز این تقویت کننده‌ها در حد مطلوبی قرار گرفته و بتوان این تقویت کننده‌ها را برای افزایش فاصله انتقال، بهبود توان و کاهش نویز در سیستم DWDM بهینه نمود. همچنین در پی آن هستیم که این تقویت کننده‌ها را در انتقال سیگنال به فواصل دوربرد به کار گرفته و طرح گستره بهینه را برای انتقال سیگنال با حداقل نویز و حداکثر بهره، ارائه داده و نتایج آن را تحلیل نمائیم.

فصل دوم : مبانی کاربردی و پیشینه طرح

۱-۲ مقدمه

در سالهای اخیر، تلاشهای بی شماری در راستای دستیابی به اهدافی نظیر افزایش ظرفیت انتقال سیستم و بهبود عملکرد سیستمهای مخابرات نوری دوربرد صورت پذیرفته است. که تمامی این اهداف، تنها با بکارگیری تکنیک مالتی پلکس با تقسیم فشرده طول موج^۱ (DWDM) قابل دستیابی است. از طرفی، توسعه سیستمهای مخابرات نوری، در گرو بکارگیری تقویت کننده های نوری پر قدرت و پر بازدهای می باشد که سیگنال نوری را مستقیماً و بدون تبدیل به حوزه الکتریکی تقویت نمایند. تقویت کننده های نوری نیمه هادی^۲ (SOA)، نقش مهمی را در سیستمهای مخابرات فیبر نوری ایفا می نمایند. این تقویت کننده ها، در مقایسه با تقویت کننده های فیبر نوری، به علت حجم کم، طیف بهره بسیار وسیع و هموار، مصرف توان اندک، یکپارچگی آسان با دیگر ادوات و هزینه اندک، به عنصری کلیدی برای سیستمهای انتقال فیبرنوری تبدیل شده اند. از این رو برای استفاده به عنوان تقویت کننده درون خطی در سیستمهای مخابراتی دو طرفه، بسیار مناسب می باشند [۲].

لذا با تنظیم دقیق عملکرد تقویت کننده می توان از آن به عنوان تقویت کننده درون خطی در سیستمهای تک کاناله و چند کاناله، استفاده نمود. تقویت کننده های نوری نیمه هادی، عنصری کاربردی در حوزه سیستمهای مخابرات نوری دوربرد می باشند. اما یکی از مهمترین چالش های موجود بر سر راه توسعه این سیستمها بهینه سازی عملکرد تقویت کننده های نوری نیمه هادی (SOA) می باشد. چرا که کارایی سیستم، مستقیماً به پارامترهای طراحی این تقویت کننده ها و همچنین نحوه چیدمان آنها در طول مسیر انتقال برای تقویت سیگنال ارسالی وابسته است [۱۴].

در این فصل قصد داریم، ابتدا به معرفی انواع تقویت کننده های نوری پرداخته، سپس به بررسی مبانی تقویت کننده های نوری پردازیم، معادلات حاکم بر آنها را بیان نموده و اندکی به بحث و تفسیر در ارتباط با این چارچوب ها پرداخته، سپس مختصری به آنالیز و بررسی تقویت کننده های نوری نیمه هادی پرداخته و اصول بیان شده را در این تقویت کننده ها بکار بگیریم. پس از آن به بررسی پیشینه پژوهشهای انجام شده در ارتباط با این موضوع پرداخته و اندکی در ارتباط با هریک توضیحاتی ارائه نموده و در نهایت، مطالب را جمع بندی کرده و دلایل گزینش این حوزه پژوهش را بیان نمائیم.

1 - Dense Wavelength Division Multiplexing (DWDM)

2 - Semiconductor Optical Amplifier (SOA)

۲-۲ انواع تقویت کننده‌های نوری

همانطور که در فصل نخست بیان گردید، تقویت کننده‌های نوری به دو دسته بزرگ تقسیم می‌گردند؛ تقویت کننده‌های فیبر نوری (FOA) و تقویت کننده‌های نوری نیمه هادی (SOA). در ادامه اندکی به معرفی تقویت کننده‌های فیبر نوری پرداخته و سپس تمرکز خود را معطوف به تقویت کننده‌های نوری نیمه هادی خواهیم نمود.

۲-۲-۱ تقویت کننده‌های فیبر نوری (FOA)

همانطور که در فصل نخست بیان گردید، از تقویت کننده‌های فیبر نوری نیز به عنوان تقویت کننده های توان، تکرار کننده و پیش تقویت کننده استفاده نمود. در این تقویت کننده‌ها محیط بهره، شامل یک فیبر تک مد متصل به یک تزویج کننده^۱ WDM است که باعث فراهم آمدن تلفات الحاقی اندک در طول موج سیگنال و پمپ می‌شود [۲].

با پمپ کردن نوری لیزر در راستای سیگنال ورودی در تزویج کننده، فرآیند تحریک رخ می‌دهد و گسیل القایی در محیط بهره فیبر، اتفاق می‌افتد. سیگنال نوری تقویت شده از انتهای دیگر فیبر که از یون‌های با آلایش سنگین و متناسب با نوع تقویت کننده ساخته شده، خارج می‌شود. انواع تقویت کننده‌های فیبر عبارتند از: تقویت کننده‌های فیبر آلایش شده با عناصر خاکی کمیاب^۲، تقویت کننده‌های رامان فیبرنوری^۳ و تقویت کننده‌های بریلوئن فیبرنوری^۴.

۲-۲-۱-۱ تقویت کننده فیبر آلایش شده با عناصر خاکی کمیاب

در راستای پیاده سازی تقویت کننده‌های فیبرنوری، از یون‌های خاکی کمیابی نظیر اربیم، هالمیوم، نئودیمیم، پراسئودیمیم، تالیوم و ایتربیوم، برای عملکرد در طول موجهای مختلف نور مرئی تا مادون قرمز استفاده می‌شود. از میان خانواده تقویت کننده‌های فیبر آلایش شده با عناصر خاکی کمیاب، آلایش‌گرهای اربیم در فیبرهای تک مد مبتنی بر سیلیکا مورد استفاده قرار می‌گیرند و به نام تقویت کننده‌های فیبر آلایش شده با اربیم^۵ (EDFA) شناخته می‌شوند.

محیط فعال، قسمتی از محیط بهره فیبر است که به صورت سنگینی توسط یون‌های اربیم آلایش می‌شود. در اینجا همانطور که در شکل (۱-۲) می‌بینیم، وارونگی جمعیت به علت فراوانی یون‌های اربیمی که از سطوح متعدد بالایی به سطح ۲ سقوط می‌کنند، شدیدتر است. هنگامی که اطلاعات نوری از چنین

1 - Coupler

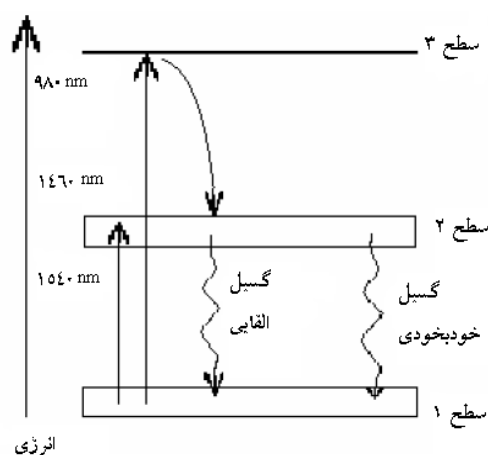
2 - Rare - Earth Doped Fiber Amplifier

3 - Raman Fiber Optic Amplifiers

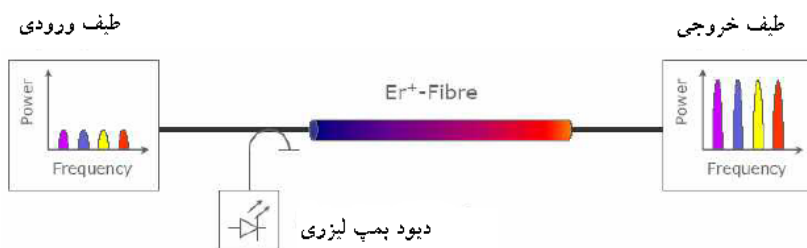
4 - Brillouin Fiber Optic amplifiers

5 - Erbium Doped Fiber Amplifier (EDFA)

فیبر دارای تراکم زیادی عبور می‌کند، باعث تحریک گذار یون‌های اربوم از سطح ۲ به سطح ۱ شده و فوتون‌هایی را با طول موج، راستا و فازی مشابه با فوتون اعمالی تولید می‌نماید [۳]. از طرفی، همانطور که در شکل (۲-۲) می‌بینیم، این تقویت کننده‌ها شامل سه مولفه اساسی هستند: فیبر آلایش شده با اربوم، پمپ لیزری و تزویج کننده گزینشی طول موج برای ترکیب طول موج سیگنال و پمپ. تعیین طول بهینه تقویت کننده به شرایطی از قبیل توان پمپ، توان سیگنال ورودی، میزان آلایش اربوم و طول موج سیگنال پمپ وابسته است. از تقویت کننده‌های فیبر آلایش شده با اربوم (EDFA) به علت قابلیت سازگاری با فیبرنوری، می‌توان به صورت گسترده‌ای در سیستم‌های مخابرات فیبرنوری استفاده کرد. این نوع تقویت کننده‌ها دارای افت الحاقی کم، تداخل اندک، بهره زیاد، عدم حساسیت به قطبش و نویز فیگر کوچک هستند. در مورد این تقویت کننده‌ها به ذکر همین موارد بسنده می‌کنیم.



شکل ۲ - ۱: دیاگرام انرژی برای سطوح مختلف در تقویت کننده فیبر آلایش شده



شکل ۲ - ۲: شمای یک تقویت کننده فیبر آلایش شده با اربوم (EDFA)

۲-۱-۲-۲ تقویت کننده رامان

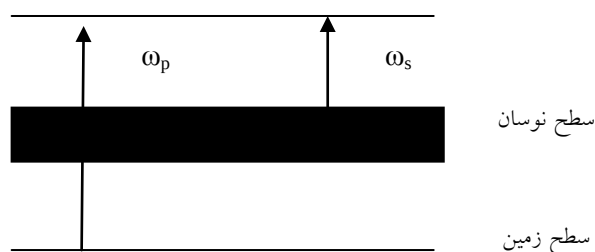
تقویت کننده‌های نوری رامان از این جهت که از پراکندگی رامان تحریک شده^۱ (SRS) برای فراهم نمودن بهره نوری استفاده می‌کنند، اصولاً با تقویت کننده‌های EDFA یا لیزرهای مرسوم متفاوت هستند. در این نوع پراکندگی، بعضی از فوتون‌های پمپ، انرژی خود را صرف تولید فوتون‌های دیگری با انرژی و

1 - Stimulated Raman Scattering (SRS)

فرکانس کمتری می‌نمایند، و انرژی باقیمانده توسط مولکول‌های سیلیکا جذب شده و این فرآیند به صورت یک سطح نوسانی تحریک شده پایان می‌پذیرد. در اینجا فونون‌های نوری در فرآیند پراکندگی شرکت می‌نمایند. این اصل را می‌توان با آوردن مثالی ساده از فیزی که از نقطه a تا b کشیده می‌شود، بیشتر توصیف نمود. اگر به فنر انرژی وارد نمائیم، کل فنر حرکت می‌نماید. با این حال، مقداری از انرژی پراکنده می‌شود. این انرژی دارای طول موج بزرگتری (توان کمتری) است و سیگنال را در آن طول موج مشخص، درون فیبر تقویت می‌نماید. بنابراین، اگر توان را در طول موج 1450 نانومتر با بهره 100 نانومتر پمپ نمائیم، در طول موج 1550 نانومتر می‌توان به سیگنال تقویت شده دست یافت [۳].

فرآیند پراکندگی رامان زمانی به فرآیند تحریک شده تبدیل می‌گردد که توان پمپ از حد آستانه فراتر رود. فرآیند SRS، هم در راستای مستقیم و هم راستای معکوس در فیبرنوری رخ می‌دهد. تداخل پمپ با نور پراکنده شده در این دو راستا، مؤلفه فرکانسی را در فرکانس نوسان $\omega_p - \omega_s$ تولید می‌نماید که به عنوان منبعی برای تحریک نوسانات مولکولی عمل می‌نماید. از آنجا که دامنه این موج پراکنده شده با پاسخ به این نوسان، افزایش می‌یابد، یک حلقه فیدبک مثبت شکل می‌گیرد. طیف بهره رامان، وابسته به زمان نزول و سطح نوسان تحریک است. زمان نزول برای گاز و مایع، حدود 1 نانوثانیه است که نتیجه آن پهنای باندی در حدود 1 گیگاهرتز است که با استفاده از فیبرهای نوری، پهنای باند به فراتر از 10 تراهرتز می‌رسد [۲۴].

در شکل (۲-۳) وارونگی جمعیت را در فیبر رامان مشاهده می‌نمائیم. طبیعت چند ماکزیمی و باند گسترده بودن طیف، به علت وجود ذات آمورف (بی شکل) شیشه است. نتیجه این عمل اینست که در یک محدوده گسترده، فرکانس استوک ω_s می‌تواند با فرکانس پمپ ω_p متفاوت باشد. لذا بیشینه بهره زمانی رخ می‌دهد که فرکانس شیفت رامان $(\omega_p - \omega_s)$ در حدود 13 تراهرتز باشد. بیشینه اصلی دیگر در نزدیکی 15 تراهرتز و حداقل بهره در 35 تراهرتز اتفاق می‌افتد. مقدار بیشینه بهره رامان در حدود 10^{-13} W/m در طول موج 1 میکرومتر است. پراکندگی رامان تحریک شده به علت داشتن پهنای باند گسترده، بسیار مفید است. از بهره رامان برای جبران تلفات فیبر استفاده می‌شود [۲۴].



شکل ۲ - ۳: وارونگی جمعیت در تقویت کننده رامان

تقویت کننده‌های رامان ادوات ساده‌ای هستند که از خواص ذاتی فیبر سیلیکا برای ایجاد تقویت، استفاده می‌نمایند تا محیط انتقال (فیبرنوری) را به یک تقویت کننده توزیع شده^۱ تبدیل نمایند، به نحوی که بهره فیبر بر تلفات در امتداد فیبر، غلبه نماید. تقویت رامان، مبتنی بر پراکندگی رامان تحریک شده (SRS) است. این فرآیند یک اثر غیرخطی فیبرنوری است که هنگامی که با نور دارای انرژی بیشتر تحریک می‌شود (پمپ می‌گردد)، بهره را در طول موج‌هایی با انرژی کمتر (تقریباً طول موجی به اندازه ۱۰۰ نانومتر بیشتر) فراهم می‌نماید. موقعیت پهنای باند بهره درون دامنه طول موج، با انتخاب طول موج پمپ، تعیین می‌گردد. بنابراین تقویت رامان در هر محدوده پنجره انتقال فیبرنوری بدست می‌آید. در فواصل دوربرد، تقویت کننده EDFA را با ترکیبی از EDFA و تقویت کننده های رامان توزیع شده^۲ (DRA)، جایگزین می‌نمائیم [۲۴].

تقویت کننده‌های رامان توزیع شده، طیف بهره هموارتر و گسترده‌تری را همراه با نویز فیگر کمتری فراهم می‌نمایند. از آنجا که چنین تقویت کننده‌هایی با EDFA بسیار سازگار هستند، می‌توان از این ترکیب برای حذف تعداد تقویت کننده‌ها و بازتولید کننده‌ها^۳ استفاده کرد. در تقویت کننده‌های مبتنی بر فیبر، هنگامی که پرتو پمپ، درون آنها انتشار می‌یابد، از پراکندگی رامان تحریک شده (SRS)، استفاده می‌نمایند. این پراکندگی از یک جنبه با گسیل القایی متفاوت است؛ در این فرآیند، فوتون تابشی پمپ، انرژی خود را برای ایجاد فوتون دیگری با انرژی تقلیل یافته و فرکانس کمتر، آزاد می‌سازد. انرژی باقیمانده به صورت نوسانات مولکولی که همان فونون‌های نوری هستند، توسط محیط بهره جذب می‌شود. این امر زمانی رخ می‌دهد که یک موج پمپ کاملاً بزرگ، در طول موجی کمتر از سیگنال تقویت شده قرار بگیرد [۳۱].

بهره رامان به شدت وابسته به توان پمپ و انحراف^۴ فرکانسی بین پمپ و سیگنال است. همانطور که در شکل (۲-۴) مشاهده می‌کنیم، عمل تقویت زمانی رخ می‌دهد که فوتون پمپ، انرژی خود را برای خلق یک فوتون در طول موج سیگنال آزاد سازد، بعلاوه مقداری انرژی نیز باقی می‌ماند که توسط فونون‌ها (انرژی نوسان) جذب می‌شود. از آنجا که محدوده گسترده‌ای از سطوح نوسانی وجود دارد، رنج وسیعی از گذارهای ممکن، می‌توانند باعث فراهم سازی بهره شوند [۲۴].

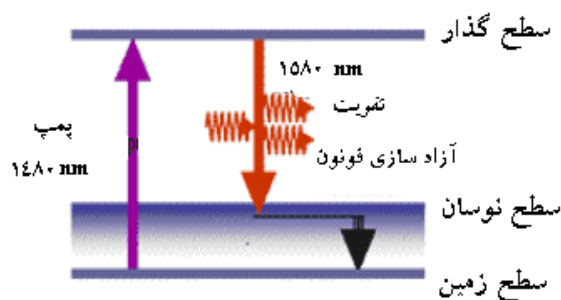
در حالت کلی، بهره رامان به صورت خطی نسبت به آفست فرکانسی بین سیگنال و پمپ، افزایش می‌یابد، در محدوده ۱۰۰ نانومتر بیشینه می‌شود و سپس با افزایش آفست، به سرعت کاهش می‌یابد. مزایای اصلی تقویت کننده های رامان عبارتست از: تحقق بخشیدن به تقویت پیوسته در طول فیبرنوری، دو طرفه بودن، پایداری بیشتر و عدم حساسیت به بازتابش. مهمترین عیب این تقویت کننده‌ها اینست که ملزومات توان پمپ، در مقایسه با SOA و EDFA نسبتاً زیاد است [۲۴].

1 - Distributed Amplifier

2 - Distributed Raman Amplifiers (DRAs)

3 - Regenerators

4 - Offset



شکل ۲ - ۴ : سطوح انرژی در حین فرآیند پراکندگی رامان تحریک شده

۲-۱-۲-۳ تقویت کننده فیبر بریلوئن

اصول عملکرد این تقویت کننده‌ها مشابه تقویت کننده‌های رامان است، به استثناء اینکه بهره نوری، توسط پراکندگی بریلوئن تحریک شده^۱ (SBS) تولید می‌گردد. در این حالت، هر یک از فوتون‌های پمپ، فوتون سیگنال را تولید می‌نمایند و انرژی باقیمانده صرف تحریک فونون‌های صوتی^۲ می‌شود. عمل تقویت زمانی رخ می‌دهد که پرتو سیگنال در راستای مخالف پرتو پمپ (راستای معکوس)، انتشار یابد. طیف بهره بریلوئن با پهنای باندی کمتر از ۱۰۰ مگاهرتز، به شدت اندک است [۲۴]. پهنای باند باریک این تقویت کننده، آن را جهت عملکرد به صورت تقویت کننده توان، پیش تقویت کننده یا تقویت کننده‌های درون خطی نامناسب می‌سازد. از این تقویت کننده برای انتخاب کانال‌های مشخصی بدون تقویت دیگر کانال‌های مجاور استفاده می‌گردد (نوعی فیلتر آکستوآپتیک).

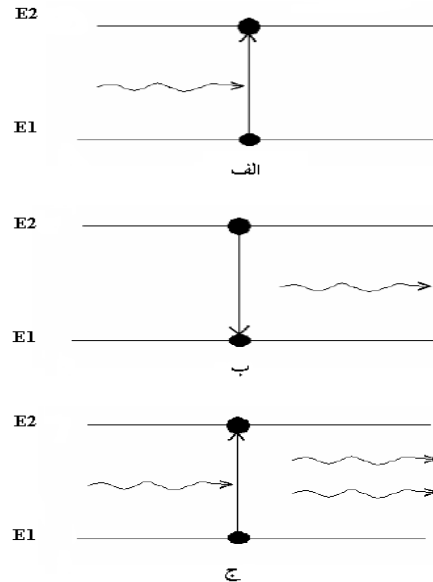
۲-۲-۲ تقویت کننده‌های نوری نیمه هادی (SOA)

تحقیقات بر روی تقویت کننده‌های نوری نیمه هادی پس از اختراع لیزرهای نیمه هادی در سال ۱۹۶۲ آغاز گردید. با این حال، در دهه ۱۹۸۰ میلادی بود که این تقویت کننده‌ها برای کاربردهای عملی توسعه یافتند و به صورت گسترده‌ای از کاربردهای بالقوه آنها در سیستم‌های نوری استفاده شد. در این قسمت، قصد داریم ابتدا به معرفی انواع تقویت کننده‌های نوری نیمه هادی پرداخته و سپس معادلات حاکم بر این تقویت کننده‌ها را مورد ارزیابی و تحلیل قرار خواهیم داد. همانطور که از مبانی لیزر می‌دانیم، تعامل میان نور و ماده در بسته‌های کوچکی از انرژی یا کوآنتا انجام می‌گیرد که این بسته‌های کوچک، فوتون نامیده می‌شوند و همچنین اتم‌ها فقط در سطوح گسسته معینی از انرژی وجود دارند، که جذب و انتشار نور، باعث گذار اتم‌ها از یک سطح گسسته انرژی به سطح دیگری از انرژی می‌شود [۳۱] و همانطور که در شکل (۵-۲) می‌بینیم این گذار به سطح انرژی E که اختلاف میان سطح بالایی انرژی E_2 و سطح پایینی E_1 است، نسبت داده می‌شود. هنگامی که انرژی فوتون E به اتم برخورد می‌کند، این انرژی ممکن است توسط

1 - Stimulated Raman Scattering (SBS)

2 - Acoustic Phonon

جذب فوتون یا اختصاراً جذب^۱، به سطح انرژی E_2 القا گردد که در شکل (۲-۵-الف) نشان داده شده است و از آنجا که اتم در سطح انرژی E_2 پایدار نمی ماند، در یک حالت تصادفی به سطح انرژی پائینی بازگشت می نماید که این عمل به تولید یک فوتون می انجامد. این فرآیند که در شکل (۲-۵-ب) نمایان است، گسیل خودبخودی^۲ نام دارد [۳].



شکل ۲ - ۵ : تعامل نور و ماده در محیط تقویت کننده: الف) جذب، ب) گسیل خودبخودی و ج) گسیل القایی.

گسیل تحریک شده^۳ (گسیل القایی)، زمانی رخ می دهد که فوتون تابشی با انرژی $E = \frac{hc}{\lambda}$ با یک الکترون در سطح انرژی بالایی تعامل نماید و باعث بازگشت الکترون به سطح انرژی پائینی شود، که این فرآیند موجب آزاد سازی فوتون دوم می گردد. همانطور که می دانیم، h ثابت پلانک، c سرعت نور و λ طول موج نور است. این فرآیند در شکل (۲-۵-ج) نشان داده شده است [۳].

بنابراین، عمل تقویت نور زمانی رخ می دهد که فوتون تابشی و فوتون انتشاری در یک راستا باشند و دو فوتون دیگر را تولید نمایند. ادامه این روند، باعث ایجاد ضرب بهمنی شده و انتشار همدوس^۴ تقویت شده حاصل می گردد. برای دستیابی به تقویت نوری می بایست، تراکم اتمی سطح انرژی بالایی بزرگتر از تراکم اتمی سطح انرژی پائینی باشد، یعنی: $N_2 > N_1$. که N_2 و N_1 به ترتیب چگالی اتمی سطوح انرژی پائینی و بالایی هستند. این شرط را شرط وارونگی جمعیت^۵ می نامند. که این عمل با تحریک الکترون به سطح انرژی بالاتر توسط منبع خارجی (پمپ کردن) صورت می گیرد [۱].

1 - Absorption
2 - Spontaneous Emission
3 - Stimulated Emission
4 - Coherent Amplified Emission
5 - Population Inversion

در حالت کلی دو نوع تقویت کننده نوری نیمه هادی داریم، یکی تقویت کننده‌های نوری نیمه هادی فابری-پروت^۱ (FPA) و دیگری تقویت کننده‌های نوری نیمه هادی موج رونده^۲ (TWA). در ادامه به اختصار درباره هر یک توضیحاتی بیان خواهیم نمود.

۲-۲-۱-۲-۲ تقویت کننده‌های نوری نیمه‌هادی فابری-پروت (FP)

در لیزرهای نیمه‌هادی به علت اینکه بازتابش در سطوح جلویی لیزر رخ می‌دهد، فیدبک نسبتاً بزرگی ایجاد می‌شود، اما هنگامی که لیزر، زیر حد آستانه بایاس شود، به صورت تقویت کننده عمل می‌کند. لذا با استفاده از مشدد فابری-پروت، می‌توان یک تقویت کننده نوری نیمه هادی فابری-پروت، ایجاد نمود. فقط می‌بایست بازتابش چندگانه در سطوح جلویی را تا حد امکان متوقف نمود [۱].

ساختار این تقویت کننده‌ها، همانند لیزرهای فابری-پروت است. در این تقویت کننده‌ها، نور ورودی به ناحیه فعال، چندین بار از سطوح برش داده شده بازتاب می‌شود و هنگامی که از مشدد خارج می‌گردد، تقویت شده است. بنابراین، سیگنال ورودی توسط یک تک‌گذر درون ناحیه فعال تقویت می‌شود. در عمل برای ایجاد ناحیه فعال بدون بازتابش، یا سطوح جلویی نیمه هادی را با پوشش ضدبازتابش می‌پوشانند، یا ناحیه فعال را نسبت به سطوح جلویی برش می‌دهند و یا با بافر کردن مواد بین ناحیه فعال و سطوح جلویی لیزر، ضریب بازتابش (R) را تا حد امکان کاهش می‌دهند [۳]. با برقراری شرط وارونگی جمعیت، گسیل تحریک شده (گسیل القایی) غالب می‌شود. برای SOA این شرط با آرایش سنگین لایه‌های پوششی نوع n و نوع p جهت جداسازی سطح فرمی^۳ باند ممنوعه تحت بایاس مستقیم پیوند P-N، تحقق می‌پذیرد. نرخ گسیل خودبخودی (R_{spon})، گسیل القایی (R_{stim}) و جذب (R_{abs})، به ترتیب، به صورت زیر نوشته می‌شوند:

$$\begin{aligned} R_{spon} &= AN_2 \\ R_{stim} &= BN_2 \rho_{em} \\ R_{abs} &= B' N_2 \rho_{em} \end{aligned} \quad (1-2)$$

در این روابط، A ، B و B' ثابت هستند. همچنین N_2 و ρ_{em} به ترتیب، چگالی اتمی سطح تحریک شده و چگالی طیفی فوتونها هستند. در موازنه حرارتی^۴، توزیع چگالی اتم‌ها، بر اساس معادله استاتیک بولتزمن صورت می‌پذیرد [۳۱]:

$$\frac{N_2}{N_1} = \exp\left(\frac{-E}{K_B T}\right) = \exp\left(\frac{-hf}{K_B T}\right) \quad (2-2)$$

1 - Fabry-Perot Semiconductor Optical Amplifier
2 - Travelling Wave Semiconductor Optical Amplifier
3 - Fermi Level
4 - Thermal Equilibrium

که در این جا، K_B ثابت بولتزمن و T دمای مطلق است. از آنجا که N_1 و N_2 در موازنه حرارتی با زمان تغییر نمی کنند، نرخ گذار به بالا^۱ و نرخ گذار به پائین^۲ بایستی باهم برابر باشند [۳۱]:

$$AN_2 + BN_2\rho_{em} = B'N_1\rho_{em} \quad (۳-۲)$$

با استفاده از روابط (۱-۲) و (۲-۲)، می توان رابطه چگالی طیفی ρ_{em} را بصورت زیر تعریف نمود [۳۱]:

$$\rho_{em} = \frac{A/B}{(B'/B)\exp\left(\frac{hf}{K_BT} - 1\right)} \quad (۴-۲)$$

نرخ گسیل القایی و نرخ جذب هم در حالتی مشابه با چگال طیفی بصورت زیر بدست می آید [۳۱]:

$$R_{stim}(\omega) = \int_{E_c}^{\infty} B(E_1, E_2) f_c(E_2) [1 - f_v(E_1)] \rho_{cv} \rho_{em} \partial E_2 \quad (۵-۲)$$

$$R_{abs}(\omega) = \int_{E_c}^{\infty} B(E_1, E_2) f_v(E_1) [1 - f_c(E_2)] \rho_{cv} \rho_{em} \partial E_2 \quad (۶-۲)$$

که در این معادله، $f_v(E_1)$ و $f_c(E_2)$ به ترتیب، احتمال وجود الکترون در باندهای هدایت و ظرفیت هستند. همچنین $\rho_{em}(\omega)$ چگال طیفی فوتون ها، ρ_{cv} چگالی طیفی توام سطوح (تعداد سطوح بر واحد حجم بر واحد انرژی) و در نهایت E_c انرژی باند هدایت می باشند.

هنگامی که چگالی تزریق حامل^۳ در لایه فعال از نرخ مشخصی که به نام نرخ گذار شناخته می شود، فراتر رود، وارونگی جمعیت تحقق می یابد و بهره نوری در ناحیه فعال تولید می شود. سیگنال ورودی انتشار یافته در ناحیه فعال با ضریب $\exp(gz)$ تقویت می شود، که g ضریب بهره و متناسب با $R_{stim} - R_{abs}$ است.

ضریب تقویت چنین تقویت کننده هایی با بکارگیری تئوری تداخل سنج^۴ فابری- پروت به صورت زیر محاسبه می گردد [۳]:

$$G_{FP}(\nu) = \frac{(1 - R_1)(1 - R_2)G(\nu)}{(1 - G\sqrt{R_1 R_2})^2 + 4G\sqrt{R_1 R_2} \sin^2[\pi(\nu - \nu_m)/\Delta\nu_L]} \quad (۷-۲)$$

که R_1 و R_2 بازتابش سطوح جلویی، ν_m فرکانس رزونانس مشدد و $\Delta\nu_L$ رنج آزاد طیفی مشدد فابری- پروت می باشند. بنابراین G_{FP} زمانی که $R_1=R_2=0$ شود، به $G(\nu)$ کاهش می یابد. همانطور که از معادله (۷-۲) مشهود است، $G_{FP}(\nu)$ زمانی که ν با یکی از فرکانس های رزونانس مشدد تلاقی پیدا می کند، ماکزیمم گشته و در بین این فرکانس ها به سرعت افت می کند. بنابراین پهنای باند تقویت کننده توسط فرکانس رزونانس مشدد مشخص می گردد. پهنای باند تقویت کننده را می توان توسط عدم تنظیم فرکانس ($\nu \approx \nu_m$)، زمانیکه G_{FP} از مقدار ماکزیمم خودش^۳ دسی بل افت می کند، بدست آورد:

1 - Upward Transition
2 - Downward Transition
3 - Injection Carrier Density
4 - Interferometer

$$\Delta \nu_A = \frac{2\Delta \nu_L}{\pi} \sin^{-1} \left(\frac{1 - G\sqrt{R_1 R_2}}{(4G\sqrt{R_1 R_2})^{1/2}} \right) \quad (8-2)$$

برای دستیابی به ضریب تقویت بالاتر، حاصلضرب $G\sqrt{R_1 R_2}$ می‌بایست کاملاً نزدیک به ۱ باشد و از طرفی همانطور که از معادله (۸-۲) بر می‌آید، پهنای باند تقویت کننده کسر کوچکی از رنج طیفی آزاد مشدد است. چنین پهنای باند اندکی تقویت کننده‌های فابری-پروت را برای کاربرد در سیستم‌های نوری مالتی پلکس با تقسیم طول موج (WDM)، نامناسب می‌نماید.

۲-۲-۲-۲ تقویت کننده‌های نوری نیمه‌هادی موج‌رونده (TW):

دسته دوم تقویت کننده‌های نوری نیمه هادی، تقویت کننده‌های موج‌رونده یا اصطلاحاً TWA هستند که با حذف سطوح بازتابش انتهایی در لیزرهای نیمه‌هادی، شکل می‌گیرند. علت نامگذاری موج‌رونده این است که سیگنال فقط در راستای مستقیم درون تقویت کننده حرکت می‌نماید. ساده‌ترین راه برای کاهش بازتابش، پوشاندن سطوح با پوشش ضدبازتابش است. از این‌رو برای اینکه تقویت کننده نوری نیمه‌هادی به صورت موج‌رونده عمل نماید، باید بازتابش به شدت اندک باشد (کمتر از ۰/۱ درصد). علاوه براین، حداقل بازتابش به خود بهره تقویت کننده نیز وابسته است [۲].

مقدار بازتابش قابل قبول سطوح بازتابشی، با تنظیم نمودن مقادیر بیشینه و کمینه G_{FP} حول رزونانس مشدد در معادله (۷-۲) بدست می‌آید و این نسبت به صورت زیر محاسبه می‌گردد [۳]:

$$\Delta G = \frac{G_{FP}^{max}}{G_{FP}^{min}} = \left(\frac{1 + G\sqrt{R_1 R_2}}{1 - G\sqrt{R_1 R_2}} \right)^2 \quad (9-2)$$

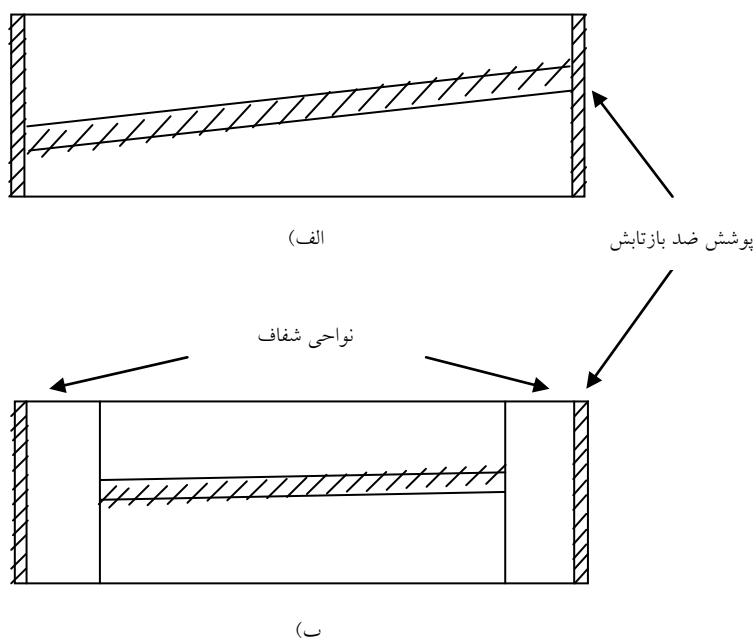
اگر ΔG از ۳ دسی‌بل فراتر رود، پهنای باند تقویت کننده بجای اینکه توسط طیف بهره تنظیم شود، توسط رزونانس مشدد محدود می‌گردد. برای اینکه $\Delta G < 2$ (همان ۳ دسی‌بل) باشد، بازتابش سطوح باید شرط زیر را برآورده سازد [۳]:

$$G\sqrt{R_1 R_2} \leq 0.17 \quad (10-2)$$

در حالت کلی، هنگامی که شرط (۱۰-۲) محقق شود، تقویت کننده نوری نیمه‌هادی به صورت موج‌رونده عمل می‌نماید. ملاحظات قابل توجهی برای ایجاد پوشش ضد بازتابش با انعکاس کمتر از ۰/۱ درصد مورد نیاز است [۱]. علاوه براین، بازهم، بسیار مشکل است که در یک روش منظم و قابل پیش‌بینی به بازتابش اندک در سطوح رسید. به همین منظور، تکنیک‌های جایگزینی برای کاهش فیدبک بازتابشی در تقویت کننده‌های نوری نیمه هادی ارائه شده است [۳]. در یک روش، همانطور که در شکل (۲-۶-الف) می‌بینیم، نوار ناحیه فعال به صورت مورب به سطوح بازتابشی متصل شده است. چنین ساختاری سطح زاویه دار یا ساختار نوار مورب نامیده می‌شود. پرتو بازتابش شده از سطح جلویی، به صورت فیزیکی توسط

سطح زاویه دار، از پرتو تابشی جدا می‌شود. ولی از آنجا که مدهای نوری در تمام لیزرهای نیمه‌هادی در ناحیه فعال پخش می‌شوند، هنوز مقدار اندکی فیدبک باقی می‌ماند. لذا در عمل، ترکیبی از پوشش ضد بازتابش و نوار مورب، می‌تواند بازتابشی کمتر از 10^{-3} ایجاد نماید (که با بهینه سازی طراحی تا حد 10^{-4} کاهش می‌یابد).

در طرحی دیگر، یک ناحیه شفاف، بین سطوح ابتدایی و انتهایی لایه فعال افزوده می‌شود [شکل (۲-۶-ب)] و پرتو نوری پیش از آنکه به حد فاصل نیمه‌هادی و هوا برسد، در این پنجره پخش می‌گردد. لذا پرتو بازتابش شده، در مسیر بازگشت، پخش شده و از تزویج نور بیشتر به ناحیه فعال جلوگیری می‌کند. چنین ساختاری را ساختار سطح مدفون شده یا ساختار سطح پنجره‌ای می‌نامند. این ساختار نیز، بازتابشی کمتر از 10^{-4} را در ترکیب با پوشش ضد بازتابش ایجاد می‌کند [۳].



شکل ۲ - ۶: روشهای پوشاندن سطوح بازتابش
(الف) ساختار نوار مورب و (ب) ساختار سطح مدفون شده

۲-۳ آنالیز بهره و نویز در تقویت کننده‌های نوری

در این بخش، قصد داریم تقویت کننده‌های نوری را در حالتی مورد تحلیل قرار دهیم که به حالت ماندگار رسیده باشند یا به عبارتی دیگر، تغییرات چگالی حامل نسبت به زمان، صفر شده باشد. برای این امر، آنالیز را از بهره سیگنال کوچک تقویت کننده آغاز نموده و با بدست آوردن بهره سیگنال بزرگ، به اتمام خواهیم رساند. لذا در ابتدا با بررسی یک سیستم لیزری همگن دو سطحی و مقایسه محیط تقویت کننده با

چنین سیستمی، نشان خواهیم داد که این نوع تقویت کننده ها، رفتاری شبیه یک سیستم لیزری دو سطحی خواهند داشت [۳]. در ادامه این موضوع را به تفصیل مورد بررسی قرار خواهیم داد.

اکثر تقویت کننده های نوری از این رو که سیگنال عبوری از خود را توسط انتشار تحریک شده (گسیل القایی) تقویت می نمایند، دارای مکانیزمی شبیه لیزر هستند. بنابراین همانطور که بیان شد، تقویت کننده های نوری، چیزی بجز لیزرهای بدون فیدبک نیستند. مؤلفه اصلی این تقویت کننده ها، بهره نوری است. این کمیت زمانی بدست می آید که تقویت کننده توسط سیگنال الکتریکی یا سیگنال نوری پمپ شود، که این عمل باعث ایجاد وارونگی جمعیت^۱ خواهد شد و همانطور که می دانیم، عمل وارونگی جمعیت که اساس کار لیزر است، سبب تقویت سیگنال ورودی خواهد شد [۱۳].

بهره تقویت کننده نوری، تنها وابسته به فرکانس (یا طول موج) سیگنال نوری نیست، بلکه به میزان شدت محلی پرتو در هر نقطه درون تقویت کننده نیز وابسته است. بنابراین مؤلفه های فرکانسی و شدتی بهره نوری، به محیط بهره وابسته است. برای تشریح مفاهیم کلی حالتی را در نظر می گیریم که محیط بهره به صورت یک سیستم دو سطحی با پهن شدگی همگن^۲، مدل سازی می شود [۳].

همانطور که از مبانی لیزر می دانیم، ضریب بهره چنین محیطی به صورت زیر نوشته می شود:

$$g(\omega) = \frac{g_0}{1 + (\omega - \omega_0)^2 T_2^2 + P/P_s} \quad (11-2)$$

در این معادله؛ g_0 حداکثر مقدار بهره، ω فرکانس نوری سیگنال تابشی، ω_0 فرکانس گذار اتمی و P توان نوری سیگنال تقویت شده است. توان اشباع (P_s) وابسته به پارامترهای محیط بهره نظیر؛ زمان فلورسانس^۳ (T_1) و سطح مقطع گذار حاملها است و برای هر تقویت کننده تعریف خاصی دارد. پارامتر T_2 در این رابطه، به نام زمان آزاد سازی دوقطبی^۴ شناخته می شود و عموماً کمتر از ۱ پیکوثانیه است. زمان فلورسانس T_1 به صورت زمان آزاد سازی جمعیت^۵ نیز تعریف می شود و معمولاً در محدوده ۱۰۰ پیکوثانیه تا ۱۰ میلی ثانیه وابسته به محیط بهره تغییر می کند. از رابطه (۱۱-۲) جهت بررسی خصوصیات مهم تقویت کننده های نوری، نظیر پهنای باند، ضریب تقویت و توان اشباع خروجی، به وفور استفاده می شود.

۲-۳-۱ طیف و پهنای باند بهره در تقویت کننده های نوری

در راستای تحلیل طیف بهره، در ابتدا ناحیه غیراشباع را در نظر می گیریم که در آن، $P/P_s \ll 1$ است. لذا با صرف نظر از P/P_s در معادله (۱۱-۲)، ضریب بهره به صورت زیر ساده می گردد:

1 - Population Inversion
2 - Homogeneously Broadened Two Level System
3 - Fluorescence Time
4 - Dipole Relaxation Time
5 - Population Relaxation Time

$$g(\omega) = \frac{g_0}{1 + (\omega - \omega_0)^2 T_2^2} \quad (12-2)$$

این معادله نشان می‌دهد که بهره، زمانی حداکثر می‌شود که فرکانس برخورد ω ، با فرکانس گذار اتمی ω_0 ، منطبق گردد. کاهش بهره، برای $\omega \neq \omega_0$ یک منحنی به شکل لورنتزی ایجاد می‌نماید که مشخصه سیستمهای دو سطحی با پهن شدگی همگن است. اما طیف بهره تقویت کننده‌ها در عمل به صورت قابل ملاحظه‌ای نسبت به شکل لورنتزی انحراف دارد [۱].

کمیت پهنای باند بهره^۱ در چنین سیستمی به صورت پهنای کامل در نصف حداکثر^۲ (FWHM) طیف بهره $g(\omega)$ تعریف می‌شود. در طیف لورنتزی، پهنای باند بهره، یا توسط $\Delta\omega_g = 2/T_2$ تعریف و یا توسط معادله زیر محاسبه می‌گردد:

$$\Delta\nu_g = \frac{\Delta\omega_g}{2\pi} = \frac{1}{\pi T_2} \quad (13-2)$$

در سیستمهای مخابرات نوری ترجیحاً از تقویت کننده‌هایی با پهنای باند نسبتاً بزرگ استفاده می‌نمائیم. زیرا بهره، حتی برای سیستم چند کاناله نیز در تمام پهنای باند ثابت می‌ماند. اما در اینجا این نکته حائز اهمیت است که در بسیاری از نوشتارها و پژوهشها مفهوم پهنای باند تقویت کننده^۳ $G(\omega)$ ، عموماً بجای پهنای باند بهره $g(\omega)$ بکار برده می‌شود. اما همانطور که در ادامه بیان می‌کنیم، این دو مفهوم، کاملاً باهم متفاوت هستند. همانطور که می‌دانیم، بهره تقویت کننده G که بنام ضریب تقویت^۴ نیز شناخته می‌شود، به صورت زیر تعریف می‌گردد:

$$G = \frac{P_{out}}{P_{in}} \quad (14-2)$$

که P_{in} و P_{out} به ترتیب توان‌های ورودی و خروجی تقویت شده موج پیوسته هستند. در ادامه می‌توانیم تعریفی را برای ضریب تقویت، با استفاده از رابطه زیر بدست آوریم [۳]:

$$\frac{dP(z)}{dz} = gP(z) \quad (15-2)$$

که $P(z)$ ، توان ورودی در فاصله z از ابتدای تقویت کننده است. پس از انتگرال گیری و ساده سازی، رابطه‌ای که برای توان تقویت کننده در فاصله z از ابتدای تقویت کننده بدست می‌آید، برابر است با:

$$P(z) = P(0) \exp(g.z)$$

و با قرار دادن شرط اولیه $P(0) = P_{in}$ و شرط مرزی $P(L) = P_{out}$ ، داریم:

$$P_{out} = P_{in} \exp(g.L) \quad (16-2)$$

1 - Gain Bandwidth
2 - Full Width at Half Maximum (FWHM)
3 - Amplifier Bandwidth
4 - Amplification Factor

و با استفاده از معادله (۲-۱۴) ضریب تقویت سیگنال بزرگ برای یک تقویت کننده با طول L بصورت زیر محاسبه می گردد:

$$G(\omega) = \exp[g(\omega).L] \quad (۲-۱۷)$$

همانطور که در رابطه بالا مشاهده می نمائیم، بهره تقویت کننده $G(\omega)$ و ضریب بهره $g(\omega)$ با یکدیگر برابر نبوده و توسط یک رابطه نمایی به یکدیگر مرتبط می گردند و از طرفی، هر دو زمانی حداکثر هستند که $\omega = \omega_0$ باشد و با عدم تنظیم سیگنال ($\omega \neq \omega_0$) هر دو کمیت کاهش می یابند. اما سرعت کاهش $G(\omega)$ ، بسیار بیشتر از $g(\omega)$ است. پهنای باند تقویت کننده ($\Delta \nu_A$) به صورت پهنای کامل در نصف حداکثر $G(\omega)$ تعریف می شود و توسط معادله زیر به $\Delta \nu_g$ مرتبط می گردد:

$$\Delta \nu_A = \Delta \nu_g \left[\frac{\ln 2}{\ln(G_0/2)} \right]^{1/2} \quad (۲-۱۸)$$

که $G_0 = \exp(g_0.L)$ ، همان بهره اشباع نشده تقویت کننده است. در شکل (۲-۷) پروفایل بهره $g(\omega)$ و ضریب تقویت $G(\omega)$ با رسم g/g_0 و G/G_0 بصورت تابعی از $(\omega - \omega_0)T_2$ نشان داده شده است [۳]. همانطور که مشاهده می کنیم، پهنای باند تقویت کننده از پهنای باند بهره کوچکتر است، که این تفاوت ناشی از ماهیت بهره تقویت کننده است.

۲-۳-۲ اشباع بهره در تقویت کننده های نوری

منشاء اشباع بهره، وابستگی $g(\omega)$ به توان، در رابطه (۲-۱۱) است. از آنجا که g با افزایش یافتن نسبت P/P_s ، کاهش می یابد، ضریب تقویت (G) نیز با افزایش توان ورودی کاهش می یابد. که به این پدیده، اشباع بهره می گویند. برای روشن شدن مطلب، حالتی را در نظر می گیریم که فرکانس سیگنال ورودی، دقیقاً برای حداکثر بهره تنظیم شده باشد ($\omega = \omega_0$). لذا با جایگذاری g از معادله (۲-۱۱) در معادله (۲-۱۵) داریم [۳]:

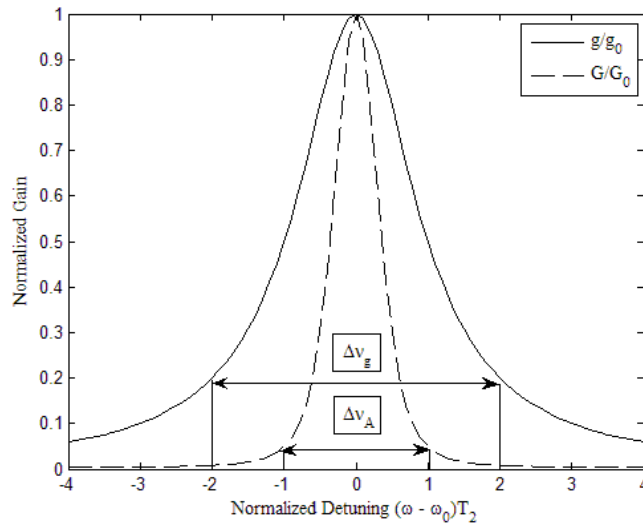
$$\frac{dP(z)}{dz} = \frac{g_0 P(z)}{1 + \frac{P(z)}{P_s}}$$

پس از انتگرال گیری و ساده سازی، رابطه توان تقویت کننده در فاصله z از ابتدای تقویت کننده برابر خواهد بود با:

$$P(z) = P(0) \exp(g_0 z) \exp\left(\frac{P(0) - P(z)}{P_s}\right) \quad (۲-۱۹)$$

با جایگذاری شرط اولیه $P(0) = P_{in}$ و شرط مرزی $P(L) = P_{out}$ خواهیم داشت:

$$P_{out} = P(L) = P_{in} \exp(g_0 L) \exp\left(\frac{P_{in} - P_{out}}{P_s}\right)$$



شکل ۲ - ۷: ضریب بهره نرمالیزه به ازای عدم تنظیم فرکانس $(\omega - \omega_0)T_2$

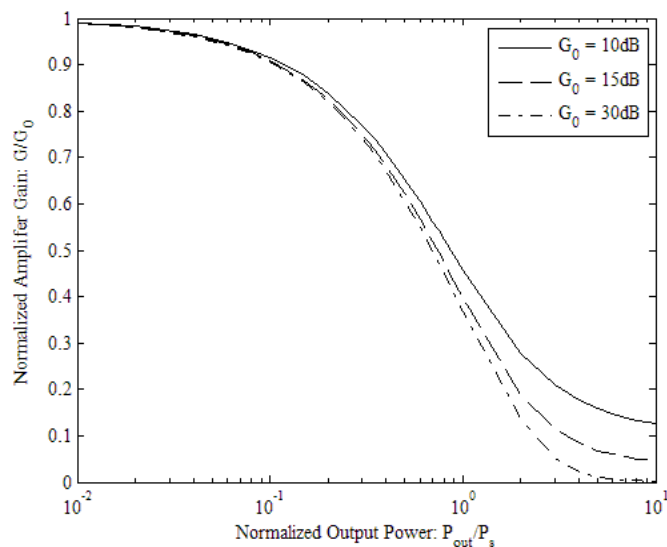
لذا پس از ساده سازی، توان خروجی تقویت کننده برابر خواهد با:

$$P_{out} = P_{in} G_0 \exp \left[-\frac{G-1}{G} \frac{P_{out}}{P_s} \right] \quad (2-20)$$

و در نهایت، با جایگذاری معادله (۲-۲۰) در رابطه (۲-۱۴)، رابطه بهره سیگنال بزرگ تقویت کننده نوری برابر خواهد شد با [۳]:

$$G = G_0 \exp \left[-\frac{G-1}{G} \frac{P_{out}}{P_s} \right] \quad (2-21)$$

این معادله نشان می دهد که هنگامی که P_{out} با P_s قابل مقایسه می شود، ضریب تقویت از مقدار غیراشباع خود، با شیب نمائی کاهش می یابد. شکل (۲-۸) مشخصه اشباع بهره را با رسم G بصورت تابعی از مقدار نرمالیزه توان خروجی نشان می دهد.



شکل ۲ - ۸: بهره نرمالیزه تقویت کننده (G/G_0) ، به ازای توان نرمالیزه خروجی (P_{out}/P_s) .

۳-۳-۲ تحلیل نویز در تقویت کننده‌های نوری

در تمام تقویت کننده‌های نوری به علت وجود انتشار خودبخودی که نویز را به سیگنال می‌افزاید، نسبت سیگنال به نویز^۱ (SNR) کاهش می‌یابد. روند کاهش نسبت سیگنال به نویز، توسط نویز فیگر (F_n) مشخص می‌گردد که افزایش آن، نشان دهنده پائین آمدن کیفیت سیگنال دریافتی است. این پارامتر همان مشخصه نویز تقویت کننده بوده و همانند تقویت کننده‌های الکترونیکی بصورت زیر تعریف می‌گردد [۳]:

$$F_n = \frac{(SNR)_{in}}{(SNR)_{out}} \quad (22-2)$$

در حالت کلی، F_n وابسته به پارامترهای متعددی است که نویز حرارتی موجود در آشکارساز را هدایت می‌کند. ساده ترین تعریف را برای F_n می‌توان با در نظر گرفتن آشکار ساز ایده‌آلی که عملکرد آن، تنها توسط نویز شات^۲ محدود می‌شود، بیان نمود [۳]:

$$(SNR)_{in} = \frac{\langle I \rangle^2}{\sigma_s^2} = \frac{(RP_{in})^2}{2q(RP_{in})\Delta f} = \frac{P_{in}}{2h\nu\Delta f} \quad (23-2)$$

در این رابطه، $\langle I \rangle = RP_{in}$ ، متوسط جریان نوری، $R = q/h\nu$ ، ضریب پاسخ^۳ یک آشکارساز نوری ایده‌آل با بازدهی کوانتومی واحد و

$$\sigma_s^2 = 2q(RP_{in})\Delta f \quad (24-2)$$

نویز شات است که با قرار دادن $I_d = 0$ ، در معادله زیر بدست می‌آید [۱]:

$$\sigma_s^2 = 2q(I_p + I_d)\Delta f \quad (25-2)$$

در این رابطه، Δf پهنای باند آشکارساز است. برای ارزیابی SNR سیگنال تقویت شده، باید انتشار خودبخودی را به نویز گیرنده اضافه نمود. چگالی طیفی نویز انتشاری خودبخودی القایی^۴ (نویز سفید) تقریباً ثابت است و بصورت زیر تعریف می‌شود [۳]:

$$S_{sp}(\nu) = (G - 1)N_{sp}h\nu \quad (26-2)$$

که ν فرکانس نوری و N_{sp} ضریب انتشار خودبخودی است (یا ضریب وارونگی جمعیت) که به صورت زیر تعریف می‌گردد [۱۳]:

$$N_{sp} = \frac{N_2}{(N_2 - N_1)} \quad (27-2)$$

که N_1 و N_2 به ترتیب چگالی اتمی سطوح صفر و تحریک شده هستند. تاثیر انتشار خودبخودی این است که نوساناتی را به سیگنال تقویت شده اضافه می‌نماید که این نوسانات، در طول فرآیند آشکارسازی

1 - Signal to Noise Ratio (SNR)

2 - Shot Noise

3 - Responsivity

4 - Spontaneous Emission Induced Noise

نوری به ریپل جریان تبدیل می‌شوند. این واقعیت بیان می‌کند که در اثر اعمال نویز به سیگنال، پارامتر غالبی که تاثیر بسزایی را در کاهش کیفیت سیگنال دارد، ضربان انتشار خودبخودی است. تشعشع انتشار خودبخودی با سیگنال تقویت شده، میکس شده و جریان $I = R|\sqrt{G}E_{in} + E_{sp}|^2$ را در آشکارساز نوری با پاسخ R تولید می‌نماید. با اشاره به اینکه E_{sp} و E_{in} در دو فرکانس متفاوت با یک اختلاف فاز تصادفی نوسان می‌کنند، این امر به سادگی نمایان است که ضربان انتشار خودبخودی بر روی سیگنال، جریان نویزی $AI = 2R(GP_{in})^{1/2}|E_{sp}|\cos\theta$ را تولید می‌کند که θ فاز تصادفی متغیر است [۳].

با متوسط گیری بر روی فاز و صرفنظر از تمام منابع نویزی، تغییرات جریان نوری به صورت زیر نوشته می‌شود [۳]:

$$\sigma^2 \approx 4(RGP_{in})(RS_{sp})\Delta f \quad (2-28)$$

که $\cos^2\theta$ را با مقدار متوسط خودش یعنی $\frac{1}{2}$ جایگزین نموده‌ایم. از این رو نسبت سیگنال به نویز (SNR) سیگنال تقویت شده توسط معادله زیر بدست می‌آید [۳]:

$$(SNR)_{out} = \frac{\langle I \rangle^2}{\sigma^2} = \frac{(RGP_{in})^2}{\sigma^2} \approx \frac{GP_{in}}{4S_{sp}\Delta f} \quad (2-29)$$

نویز فیگر تقویت کننده، با جایگذاری معادله (۲۷-۲) و (۲۹-۲) در معادله (۲۲-۲) بدست می‌آید و اگر همچنان از معادله (۲۶-۲) برای S_{sp} استفاده نمائیم، داریم [۳]:

$$F_n = 2N_{sp}(G-1)/G \approx 2N_{sp} \quad (2-30)$$

این معادله نشان می‌دهد که SNR سیگنال تقویت شده، حتی برای یک تقویت کننده ایده‌آل با $n_{sp} = 1$ ، هم به میزان ۳ دسی‌بل، کاهش می‌یابد. برای بیشتر تقویت کننده‌ها در کاربردهای عملی، F_n فراتر از ۳ دسی‌بل است و حتی به ۶ تا ۸ دسی‌بل نیز می‌رسد. برای کاربرد تقویت کننده‌ها در سیستم‌های مخابراتی، F_n تقویت کننده نوری باید تا حد امکان اندک باشد [۳].

۲-۴ تحلیل بهره و انتشار نویز در تقویت کننده‌های نوری نیمه هادی (SOA)

۲-۴-۱ آنالیز بهره در تقویت کننده‌های نوری نیمه هادی

همانطور که بیان شد، ضریب تقویت یک تقویت کننده نوری نیمه‌هادی، توسط معادله (۷-۲) محاسبه می‌گردد. وابستگی فرکانسی ضریب تقویت، به علت وابستگی $G(v)$ به فرکانس، در صورت برقراری شرط (۱۰-۲) است. با اندازه‌گیری بهره تقویت کننده، ریپل‌هایی که ناشی از باقیمانده بازتابش سطوح هستند، در طیف بهره ظاهر می‌شوند [۳]. در صورت عملکرد تقویت کننده در محدوده TW ، ریپل‌های بهره، قابل صرفنظر بوده و پهنای باند ۳ دسی‌بلی تقویت کننده نسبتاً وسیع خواهد بود. جهت بررسی اشباع بهره،

بیشینه بهره را در نظر می‌گیریم و فرض می‌نمائیم که بهره به صورت خطی نسبت به چگالی حامل (N) افزایش می‌یابد [۱۳]:

$$g(N) = (\Gamma \alpha_g)(N - N_t) \quad (2-31)$$

در این رابطه، Γ ضریب تحدید نوری^۱، α_g بهره تفاضلی^۲ (سطح مقطع بهره)، V حجم محیط فعال و N_t مقدار چگالی مورد نیاز حاملها برای گذار^۳ است. گسترده شدن مد موج بر به خارج از محیط بهره، توسط فاکتور $\Gamma = d/d_{eff}$ توصیف می‌گردد، که d و d_{eff} به ترتیب، ضخامت و ضخامت موثر لایه فعال می‌باشند. کاهش پارامتر Γ باعث گسترده‌گی بیشتر مد موج بر و در نتیجه، کاهش بهره تقویت کننده خواهد شد. چگالی حاملها (N) با جریان تزریق و توان سیگنال، همانطور که در معادله $GP - \frac{N}{\tau_c} - \frac{I}{qV} = \frac{dN}{dt}$ می‌بینیم، در ارتباط بوده و متناسب با این پارامترها تغییر می‌نماید.

با بیان تعداد فوتونها در واحد توان نوری، این رابطه را می‌توان به صورت زیر، باز چینش نمود [۳]:

$$\frac{dN}{dt} = \frac{I}{qV} - \frac{N}{\tau_c} - \frac{\alpha_g \Gamma (N - N_t)}{wdhv} P \quad (2-32)$$

که τ_c طول عمر حاملها^۴ است. در حالتی که پرتو لیزر به صورت موج پیوسته، یا پالسی طولانی‌تر از τ_c باشد، مقدار چگالی حامل، در حالت ماندگار با قرار دادن $dN/dt = 0$ در معادله فوق بدست می‌آید، لذا پس از ساده سازی داریم:

$$\frac{dN}{dt} = \frac{I}{qV} - \frac{N}{\tau_c} - \frac{\alpha_g \Gamma (N - N_t)}{wdhv} P = 0$$

پس از حل معادله، نهایتاً رابطه چگالی حاملها به صورت زیر بدست می‌آید:

$$N = \frac{\frac{I\tau_c}{qV} + \frac{P\alpha_g\Gamma\tau_c N_t}{wdhv}}{(1 + \frac{P}{\alpha_g\tau_c\Gamma wdhv})} \quad (2-33)$$

با جایگذاری رابطه (2-33) در معادله (2-31) و تعریف توان اشباع بصورت $P_s = \frac{h\nu\sigma_m}{\alpha_g\tau_c\Gamma}$ ، داریم:

$$\Rightarrow g(N) = (\Gamma \alpha_g) \left(\frac{\frac{I\tau_c}{qV} + \frac{P}{P_s} N_t - N_t - N_t \frac{P}{P_s}}{(1 + \frac{P}{P_s})} \right)$$

در نهایت رابطه‌ای که بهره را به چگالی حاملها نسبت می‌دهد، به صورت زیر محاسبه می‌گردد:

1 - Optical Confinement Factor
2 - Differential Gain (Gain Crossover)
3 - Transparency Carrier Density
4 - Carrier Lifetime

$$g(N) = (\Gamma \alpha_g) \left(\frac{\frac{I\tau_c}{qV} - N_t}{1 + \frac{P}{P_s}} \right) \quad (34-2)$$

این معادله را می‌توان به صورت زیر نیز تعریف نمود [۳]:

$$g = \frac{g_0}{1 + \frac{P}{P_s}} \quad (35-2)$$

که g_0 بهره سیگنال کوچک بوده و با مقایسه روابط (۳۵-۲) و (۳۴-۲) به صورت زیر بدست می‌آید:

$$g_0 = (\Gamma \alpha_g) (I\tau_c / qV - N_t) \quad (36-2)$$

با مقایسه روابط (۱۱-۲) و (۳۵-۲) در می‌یابیم که بهره تقویت کننده نوری نیمه‌هادی در حالتی مشابه با یک سیستم دو سطحی به اشباع می‌رود. لذا می‌توان این تقویت کننده را با یک سیستم دو سطحی، هم تراز دانست. از این پس می‌توان بهره سیگنال را بزرگ را نیز با روشی مشابه با تقویت کننده‌های نوری بدست آورد که در ادامه به این موضوع خواهیم پرداخت.

زمانی که توان ورودی تقویت کننده (P_{in})، به اندازه‌ای افزایش یابد که قابل مقایسه با توان اشباع (P_s) گردد، بهره تقویت کننده اشباع شده و ضریب تقویت، علیرغم افزایش توان ورودی، کاهش می‌یابد. لذا بهره اشباع نشده تقویت کننده برابر است با [۲]:

$$G_0 = \exp(g_0 \cdot L) \quad (37-2)$$

که L طول تقویت کننده نوری نیمه هادی است. از طرفی، همانطور که می‌دانیم، بهره سیگنال بزرگ هر تقویت کننده به صورت زیر تعریف می‌گردد:

$$G = \frac{P_{out}}{P_{in}} \quad (38-2)$$

لذا با در نظر گرفتن شرط اولیه $P(0) = P_{in}$ و شرط مرزی $P(L) = P_{out} = G \cdot P_{in}$ و با انتگرال گیری از G در راستای طول تقویت کننده، رابطه ضریب تقویت سیگنال بزرگ (همانند تقویت کننده‌های نوری) به صورت زیر محاسبه می‌گردد:

$$G = G_0 \exp \left(- \frac{G-1}{G} \frac{P_{out}}{P_s} \right) \quad (39-2)$$

همانطور که مشهود است، این رابطه نشان می‌دهد که ضریب تقویت، هنگامی که P_{out} با P_s قابل مقایسه می‌شود، از مقدار غیر اشباع خودش یعنی G_0 کاهش می‌یابد.

۲-۴-۲ تحلیل تقویت کننده‌های نوری نیمه هادی (SOA) از نقطه نظر انتشار نویز

در این قسمت ابتدا توان نویز انتشاری را مورد بررسی قرار داده، سپس به بررسی انواع نویز در این تقویت کننده‌ها پرداخته و در نهایت، تقویت کننده را از لحاظ نویز فیگر تحلیل خواهیم نمود.

۲-۴-۲-۱ تحلیل توان نویز انتشاری و نویز تقویت کننده

با دانستن بهره تقویت کننده، می‌توان توان نویز انتشاری خودبخودی^۱ در خروجی تقویت کننده را نیز محاسبه نمود. لذا با توجه به [۲۱] داریم:

$$P_{ASE} = P_{sp} = N_{sp} (G-1) h f B_o \quad (۴۰-۲)$$

در این رابطه، N_{sp} ضریب گسیل خودبخودی (وابسته به چگالی حامل)، h ثابت پلانک، f فرکانس نوری و B_o پهنای باند نوری تقویت کننده می‌باشند. بنابراین جریان نوری هم ارز با توان گسیل شده خودبخودی برابر است با [۲۱]:

$$i_{sp} = \frac{P_{sp} \cdot q}{h f} = N_{sp} (G-1) B_o q \quad (۴۱-۲)$$

در هر تقویت کننده نوری نیمه هادی، سه نوع نویز وجود دارد که عبارتند از؛ نویز شات^۲ (N_{shot})، نویز ضربه‌ای سیگنال به انتشار خودبخودی^۳ (N_{sig-sp}) و نویز ضربه‌ای انتشار خودبخودی به خودبخودی^۴ (N_{sp-sp})، که همگی وابسته به جریان هم ارز نوری بوده و به صورت زیر محاسبه می‌گردند [۲۱]:

$$N_{shot} = 2 B_o q i_{sp} \quad (۴۲-۲)$$

$$N_{sig-sp} = \frac{4 G I_s \eta_{in} \eta_{out}^2 i_{sp} L_1^2 B_e}{B_o} \quad (۴۳-۲)$$

$$N_{sp-sp} = \frac{i_{sp}^2 B_e (2 B_o - B_e)}{m B_o^2} \quad (۴۴-۲)$$

$$N_{tot} = N_{shot} + N_{sig-sp} + N_{sp-sp} + N_{th} \quad (۴۵-۲)$$

در این روابط، B_e پهنای باند الکتریکی، m تعداد مدهای قطبش، I_s جریان نوری هم ارز با توان ورودی تقویت کننده، η_{in} و η_{out} بازدهی تزویج ورودی و خروجی تقویت کننده، L_1 افت نوری بین تقویت

1 - Amplified Spontaneous Emission Noise Power (ASE)

2 - Shot Noise

3 - Signal to Spontaneous Beat Noise

4 - Spontaneous to Spontaneous Beat Noise

کننده و گیرنده و N_{th} نویز حرارتی گیرنده می‌باشد. از تحلیل فوق در می‌یابیم که، در مقادیر اندک جریان بایاس، با افزایش توان سیگنال ورودی، حتی اگر توان نویز انتشاری خود بخودی تقویت شده، نویز کلی در و نویز فیگر هم کاملاً اندک باشند، ضریب تقویت کاهش می‌یابد که این امر باعث افزایش تداخل بین کانالی در سیستم انتقال چند کاناله می‌گردد. همچنین می‌توان دریافت که برای مقادیر زیاد جریان بایاس، توان نویز خود بخودی تقویت شده، نویز کلی و نویز فیگر، حتی زمانی که توان ورودی بیشتر از توان اشباع باشد، به شدت افزایش می‌یابند. بنابراین، می‌بایست به مقدار بهینه و قابل قبولی برای جریان بایاس دست یافت تا تمامی پارامترها در حد مطلوبی قرار بگیرند.

۲-۲-۴-۲ بررسی نویز فیگر در تقویت کننده‌های نوری نیمه هادی

نویز فیگر در تقویت کننده‌های نوری نیمه هادی از حداقل مقدار خود یعنی ۳ دسی‌بل بسیار بیشتر بوده و یکی از معایب این تقویت کننده‌ها همین بالا بودن نویز فیگر می‌باشد. مولفه غالب در این کمیت، ضریب انتشار خودبخودی (N_{sp}) است که برای این تقویت کننده‌ها از معادله (۲-۲۷) با جایگذاری N_1 و N_2 به ترتیب با N و N_t بدست می‌آید. ضریب دیگری که در این کمیت نقش دارد، تلفات داخلی (نظیر جذب حامل آزاد یا تلفات پراکندگی) است که بهره در دسترس را از g به $g - \alpha_p$ کاهش می‌دهد. با بکارگیری معادله (۲-۳۰) و در نظر گرفتن این مولفه‌های اشتراکی، نویز فیگر به صورت زیر نوشته می‌شود:

$$F_n = 2 \left(\frac{N}{N - N_t} \right) \left(\frac{g}{g - \alpha_p} \right) \quad (2-46)$$

بازتابش باقی مانده از سطوح جلویی، F_n را با ضریب افزایشی که با $(1 + R_1.G)$ تقریب زده می‌شود، افزایش می‌دهد. اما در بیشتر تقویت کننده‌های موج رونده، از آنجا که $(R_1.G \ll 1)$ می‌باشد، لذا می‌توان از اثر این فاکتور صرف‌نظر نمود. لذا مقادیر نامی F_n برای تقویت کننده‌های نوری نیمه هادی در محدوده ۵ تا ۷ دسی‌بل می‌باشد [۳].

۲-۵ مقایسه اجمالی خصوصیات انواع تقویت کننده‌های نوری

در تقویت کننده‌های نوری نیمه هادی (SOA) و تقویت کننده‌های آلایش شده با اربیم (EDFA) بهره نوری به مراتب بیشتر از ۲۰ دسی‌بل است، در حالیکه در تقویت کننده‌های رامان فیبرنوری، بهره به مقادیر اندکی محدود می‌شود [۳]. جریان بایاس در تقویت کننده‌های نوری نیمه هادی را می‌توان تا حد ۵۰ میلی آمپر کاهش داد، اما در تقویت کننده‌های فیبر رامان و اربیم، به علت نیاز به توان پمپ بالا، میزان تغذیه بسیار زیادی مورد نیاز است. طیف بهره تقویت کننده‌های نوری نیمه هادی (SOA) به پارامترهایی نظیر باند ممنوعه نیمه هادی، جریان بایاس تقویت کننده و بازتابش سطوح جلویی وابسته است [۳]. تفاضل فرکانس سیگنال

و پمپ (شیفت استوک)^۱ برای تقویت کننده‌های بریلوئن (SBS) در مقایسه با تقویت کننده‌های رامان (SRS) سه برابر کمتر است [۲۴]. از طرفی، اعواج بین مدولاسیونی^۲ و اشباع بهره، باعث القاء تداخل کانالی در سیستم های مخابراتی WDM می‌شود که این تداخل در تقویت کننده‌های فیبر، به مراتب کمتر از تقویت کننده‌های نوری نیمه هادی می‌باشد. جهت بررسی دقیقتر، خصوصیات اصلی انواع تقویت کننده‌های نوری در جدول (۱-۲) لیست شده‌اند [۱، ۳، ۱۹ و ۲۴].

جدول ۲ - ۱: مقایسه انواع تقویت کننده‌های نوری

تقویت کننده مشخصه	نوری نیمه هادی	آرایش شده با اریوم	رامان	بریلوئن
بهره غیراشباع قطعه (dB)	بیش از ۲۰	بیش از ۲۰	۵ تا ۱۵	۲۵
توان پمپ نوری (mW)	ندارد	۲۰ تا ۵۰	۱۰۰ تا ۲۰۰	کمتر از ۱۰
طول موج پمپ (nm)	ندارد	۸۲۰، ۹۸۰ و ۱۴۰۰ تا ۱۵۰۰	شیفت استوک زیر سیگنال	شیفت استوک زیر سیگنال
جریان بایاس (mA)	بین ۵۰ تا ۵۰۰	بیش از ۱۰۰	بیش از ۵۰۰	بیش از ۵۰
طول موج کاری (nm)	تمام طول موج‌ها	۱۵۲۵ تا ۱۵۶۵	تمام طول موج‌ها (وابسته به پمپ)	تمام طول موج‌ها (وابسته به پمپ)
پهنای باند (nm)	۲۰ تا ۵۰	۱۰ تا ۴۰	۲۰ تا ۴۰	۰/۰۰۱
افت توزیع (dB)	۵ تا ۶	کمتر از ۱	کمتر از ۱	کمتر از ۱
حساسیت به قطبش (dB)	چند دسی بل	۰	۰	۰
توان اشباع خروجی (mW)	چندین میلی وات	چند میلی وات	تنها به پمپ وابسته است	تنها به پمپ وابسته است
راستا	دو جهته	دو جهته	دو جهته	تک راستا
نویز	اندک	اندک	بسیار اندک	بسیار اندک

تقویت کننده‌های نوری نیمه هادی در مقایسه با تقویت کننده‌های فیبرنوری، به علت حجم کم، طیف بهره بسیار وسیع و هموار، مصرف توان کم، سادگی تطبیق با دیگر ادوات و هزینه اندک، جایگزین مناسبی

1 - Stokes Shift

2 - Inter-Modulation Distortion

برای تقویت کننده‌های فیبرنوری در سیستمهای انتقال WDM می‌باشند و به علت داشتن همین خصوصیات به عنصری کلیدی برای تمام شبکه‌های نوری تبدیل شده‌اند. این تقویت کننده‌ها را در ناحیه بهره غیر اشباع بکار می‌گیرند تا از القای تداخل کانالی عمده، جلوگیری شود. با تنظیم دقیق عملکرد تقویت کننده‌های نوری نیمه هادی می‌توان از آنها به عنوان تقویت کننده‌های درون خطی برای سیستم های تک کاناله و چند کاناله استفاده نمود [۳]. لذا تقویت کننده‌های نوری نیمه هادی، عنصری کلیدی برای شبکه‌های تمام نوری هستند. اگرچه، اکثر سیستمهای مخابرات نوری، از تقویت کننده‌های فیبرنوری برای تقویت سیگنال استفاده می‌کنند، با این حال، تقویت کننده‌های نوری نیمه هادی (SOA) برای یکپارچه سازی سیستم، بسیار مناسبتر هستند و همچنین می‌توان از آنها به عنوان قطعه‌ای^۱ کنشمند استفاده کرد. این خصوصیات عبارتند از: تبدیل طول موج، دی مالتی پلکس نوری و عملیات منطقی نوری. بعلاوه تقاضا برای ظرفیت بیشتر، پژوهش‌ها را به سمت گسترش سیستم‌های انتقال مبتنی بر مالتی پلکس تقسیم فشرده طول موج هدایت نموده است.

۲-۶ بررسی و تحلیل پژوهش‌ها و نوشتارهای پیشین در ارتباط با موضوع

همانطور که بیان شد، تمام سیستمهای لیزری قبل از رسیدن به آستانه لیزینگ، می‌توانند به صورت تقویت کننده عمل نمایند. لذا با اختراع لیزرهای نیمه هادی در سال ۱۹۶۰ میلادی، تحقیقات بر روی تقویت کننده‌های نوری نیمه هادی نیز آغاز گردید و در دهه ۸۰ میلادی این تقویت کننده‌ها برای کاربردهای عملی توسعه یافتند و به صورت گسترده‌ای در سیستم‌های نوری مورد استفاده قرار گرفتند. از ابتدای امر تا کنون پژوهش‌های گوناگونی در راستای بهینه سازی و بکارگیری تقویت کننده های نوری نیمه هادی در سیستمهای مخابرات نوری انجام گرفته است که در ادامه، برخی را به اختصار بیان می‌نمائیم.

ایده اولیه آرایش فیبرهای نوری با یون‌های خاکی کمیاب، برای تحقق بخشیدن به تقویت کننده‌های نوری، توسط [۱۷] مورد بررسی و کاوش قرار گرفت. نخستین تقویت کننده های فیبرنوری توسط لامپهای فلاش پمپ شده و در مد پالسی عمل می‌کردند. در اواسط دهه ۸۰ میلادی گروه تحقیقاتی در دانشگاه سوت هامپتون، به سرپرستی پروفیسور پاین [۲۳]، فناوری بازنشانی یونهای کم یاب خاکی را بر روی فیبر تک مد سیلیکا ابداع نموده و لذا نخستین تقویت کننده فیبر آرایش شده با اریوم را در سال ۱۹۸۷ تولید نمودند. تقویت کننده‌های نوری نیمه هادی (SOA) در سال ۱۹۶۲ پا به عرصه وجود گذارده و به همراه تقویت کننده‌های رامان فیبرنوری در سال ۱۹۸۰ جهت کاربردهای عملی وارد بازار گردیدند [۲].

نسل چهارم سیستم‌های نوری از تقویت کننده‌های نوری برای افزایش فاصله تکرار کننده‌ها و بهبود نرخ بیت در سیستم های مالتی پلکس با تقسیم طول موج، استفاده می‌نمودند و امروزه در اکثر سیستم های

WDM، از این تقویت کننده‌ها برای جبران تلفات فیبرنوری به وفور استفاده می‌گردد. در حال حاضر، تاکید سیستم‌های نوری WDM بر افزایش ظرفیت سیستم بوسیله تقویت همزمان تمامی کانال‌ها با بکارگیری تقویت کننده‌هایی است که محدوده طیفی $1/45$ تا $1/62$ میکرومتر را پوشش می‌دهند. پس از سال ۱۹۹۵ میلادی، تقویت کننده‌های نوری به عنصری جدایی ناپذیر در اغلب سیستم‌های مخابرات نوری تبدیل گشته اند. در ادامه به طور موضوعی به بررسی پژوهشهای انجام شده بر روی هر یک از خصوصیات و مشخصه های تقویت کننده‌های نوری نیمه هادی می‌پردازیم.

۲-۶-۱ اثرات غیرخطی در تقویت کننده‌های نوری

اثرات غیرخطی فراوانی در تقویت کننده‌های نوری وجود دارد که حتی بازم با وجود زیاد بودن حاصلضرب بهره در پهنای باند، مانع بکارگیری آنها در کاربردهای گوناگون در سیستم‌های مخابرات نوری می‌شود. این اثرات غیرخطی شامل اشباع بهره، میکس چهار موج^۱ (FWM)، مدولاسیون بهره متقابل^۲ و نویز فاز^۳ و مواردی از این دست می‌شود که باعث کاهش بازدهی سیستم‌های مخابرات نوری می‌گردد.

۲-۶-۱-۱ اشباع بهره

با افزایش طول ناحیه فعال، توان سیگنال افزایش می‌یابد. اما زمانی که توان به شدت افزایش یابد، ضریب بهره شروع به کاهش نموده که این امر باعث کاهش توان سیگنال شده و عمل تقویت نیز، دستخوش این تغییرات می‌گردد. این اثر که به علت شدید بودن توان نوری، باعث به دام انداختن تمام الکترونهای باند هدایت می‌گردد را اشباع بهره می‌نامند. از این رو افزایش بیشتر تعداد فوتونهای خارجی، هیچگونه گذار دیگر الکترونها را از باند هدایت به ظرفیت تحریک نمی‌نماید و بنابراین هیچ فوتون تحریک شده اضافی تولید نمی‌شود. لذا همانطور که بیان شد بهره کاهش می‌یابد.

۲-۶-۱-۲ میکس چهار موجی و مدولاسیون بهره متقابل

همانطور که می‌دانیم، در شبکه‌های مخابرات نوری WDM، چندین کانال به طور همزمان تقویت می‌شوند. بنابراین، امری طبیعی است که تداخل^۴ (کراس تاک) در بین کانالها اتفاق افتد. از طرفی، اصولاً دو نوع تداخل در تقویت کننده‌های نوری نیمه هادی رخ می‌دهد؛ تداخل بین کانالی و اشباع متقابل. تداخل بین کانالی زمانی رخ می‌دهد که دو کانال با طول موج متفاوت، وارد SOA شوند که در این زمان، تداخل

1 - Four Wave Mixing (FWM)
2 - Cross Gain Modulation (XGM)
3 - Phase Noise
4 - Crosstalk

غیرخطی باعث تولید سیگنال‌هایی در فرکانس تداخل شده که در مقایسه با منشاء خود به شدت تقویت می‌گردند. این اثر در تقویت کننده‌های نوری نیمه هادی به نام میکس چهار موجی شناخته می‌شود. اشباع متقابل زمانی رخ می‌دهد که تقویت کننده‌های نوری نیمه هادی در حالت اشباع کار می‌کنند و کانالها بین دو حالت قطع و وصل تغییر می‌نمایند. در این حالت، بهره دستخوش تغییراتی در جهت معکوس می‌شود. این اثر در تقویت کننده‌های نوری نیمه هادی به نام اشباع بهره متقابل^۱ یا مدولاسیون بهره متقابل (XGM) شناخته می‌شود. به عبارت دیگر، مدولاسیون بهره متقابل، حاصل اشباع بهره در تقویت کننده‌های نوری نیمه هادی است.

این عمل زمانی اتفاق می‌افتد که موج نوری با دو طول موج متفاوت (پراب و پمپ) به تقویت کننده تزریق شود. هنگامی که SOA در شرایط زیر اشباع بهره کار می‌کند، بهره نوری در دسترس، بین دو طول موج به تناسب چگالی فوتونی نسبی هریک توزیع می‌شود. هر تغییری در سطح توان طول موج پمپ، اثری معکوس بر روی بهره در دسترس طول موج پراب می‌گذارد و نتیجه این فرآیند، انتقال اطلاعات خواهد بود. این تغییر در بهره، باعث ایجاد تغییراتی در تقویت سیگنال دیگر می‌گردد زیرا تمامی سیگنالها بهره یکسانی را که توسط یک محیط فعال تولید می‌شود، به اشتراک می‌گذارند. این تغییرات، وابسته به نرخ تغییرات بهره است که از نرخ بیت ورودی پیروی می‌کند.

در تقویت کننده‌های نوری نیمه هادی، طول عمر حامل کمتر از ۱ نانوثانیه است، لذا تمامی نرخ بیت های کمتر از ۱ Gb/s باعث ایجاد تداخل کانالی شدیدی می‌شوند [۱۹]. اما در تقویت کننده های EDFA تداخل اصلاً اهمیت ندارد، زیرا طول عمر حامل در حد ۱۰ میلی ثانیه است. این امر، بدین معناست که تمام نرخ بیت‌های بالاتر از ۱۰۰ کیلوهرتز، تداخلی ایجاد نمی‌نمایند. برای کاهش تداخل در تقویت کننده‌های نوری نیمه هادی می‌بایست توان اشباع را افزایش داده و طول عمر حامل را کاهش دهیم. از طرفی از آنجا که در فرمت مدولاسیون^۲ DPSK توان سیگنال ثابت است، این فرمت، توجه بسیاری از پژوهشگران را به خود جلب کرده است تا با اعمال آن به لینک انتقال WDM مبتنی بر تقویت کننده‌های نوری نیمه هادی، بتوان اثر مدولاسیون بهره متقابل را کاهش داد [۲۸].

۲-۶-۱-۳ حساسیت به قطبش در تقویت کننده‌های نوری نیمه هادی

همانطور که می‌دانیم، ناحیه فعال دارای ساختاری کریستالی و مستطیلی شکل است. لذا بهره تقویت کننده به شدت وابسته به قطبش است. بهره تقویت کننده‌های نوری نیمه هادی به اندازه ۵ تا ۷ دسی بل ناشی از قطبش تغییر می‌نماید [۱]. جهت کاهش وابستگی بهره به قطبش، نیازمندیم که ابتدا سطح مقطع ناحیه

1 - Cross Gain Saturation

2 - Differential Phase Shift Keying Modulation (DPSK)

فعال را به صورت مربعی در آورده، سپس دو تقویت کننده را به صورت سری یا موازی اتصال دهیم تا بهره نا برابر ناشی از قطبش عمودی را جبران نمائیم. همچنین می توان با دوبار عبور سیگنال از یک مسیر یکسان، وابستگی بهره را کاهش داد [۳]. بنابراین، بهره ناشی از قطبش به $0/5$ دسی بل کاهش می یابد [۲۱].

۲-۶-۱-۴ نویز فاز در تقویت کننده های نوری نیمه هادی (SOA)

تغییرات شدت نور در محیط تقویت کننده، باعث تغییر ضریب شکست این تقویت کننده ها می شود. این تغییرات در ضریب شکست، باعث شیفت غیرخطی سیگنال شده که نتیجه آن، افزایش مدولاسیون فاز خودالقا^۱ (SPM) خواهد بود. در نرخ بیت های بالا، ضربان ناشی از نویز به شدت اندک است. در این مقاله بیان شده است که با افزایش نرخ بیت و طول عمر حامل در SOA برای تقویت سیگنال DPSK تک کانال، می توان مدولاسیون خودالقاء اشباع را به شدت کاهش داد. پدیده ای که در آن، تغییرات شدت سیگنال نوری، ضریب شکست تقویت کننده نوری نیمه هادی را تغییر می دهد و بعلاوه، فاز سیگنالهای نوری دیگری را هم که در همان راستا انتشار می یابند، مدوله می نماید، مدولاسیون فاز متقابل^۲ (XPM) نام دارد [۱۵]. درباره این اثر در مقالات و نوشتارهای پیشین مطالب زیادی بیان نشده است.

۲-۶-۲ بهره و پهنای باند تقویت کننده های نوری

در سیستمهای مخابرات نوری، برای انتقال اطلاعات چندرسانه ای توسط تقویت کننده های نوری، می بایست حاصلضرب بهره در پهنای باند، به میزان کافی بزرگ باشد. تقویت کننده های فابری- پروت (FPA) بیشینه بهره ای را که ریپل بهره در رزونانس نامیده می شود، از خود نشان می دهند که با افزایش بازتابش سطوح، افزایش می یابد. در این تقویت کننده ها، بازتابش را تا حد مشخصی می توان افزایش داد و همانطور که گفته شد، اگر در این تقویت کننده ها $R_1 = R_2 = 0$ باشد تقویت کننده، به تقویت کننده موج رونده تبدیل می گردد [۱۳].

لذا برای دستیابی به بهره زیاد در تقویت کننده های موج رونده، نیازمند آن هستیم که ناحیه فعالی را با طول مناسب ایجاد نمائیم از این رو مشکل اشباع بهره در این تقویت کننده ها بوجود می آید. پهنای باند تقویت کننده های فابری- پروت اندک است اما بهره آنها زیاد است. در عوض، تقویت کننده های موج رونده، پهنای باندی بزرگ و بهره ای کمتر از فابری- پروت دارند. با استناد به پژوهش [۱۹] پهنای باند تقویت کننده های فابری- پروت، در حدود $0/0086$ نانومتر و پهنای باند تقویت کننده های موج رونده در حدود 40 نانومتر و همچنین ساختار FPA در مقایسه با TWA بسیار پیچیده و پرهزینه تر است.

1 - Self-Induced Phase Modulation (SPM)

2 - Cross Phase Modulation (XPM)

آگراوال و آلسون [۵] در پژوهشی بنیادی، مدلی را برای بررسی رفتار تقویت کننده‌های نوری نیمه هادی در کاربردهای تقویت سیگنال و سوئیچینگ ارائه نموده‌اند که راه‌گشای تحلیل رفتاری این تقویت کننده‌ها می‌باشد. در این پژوهش، دلایل پهن شدگی پالس در تقویت کننده با استفاده از مدل ریاضی و همچنین به صورت تجربی بررسی شده، و نتایج این دو با یکدیگر مقایسه گردیده است. از سویی دیگر، کانلی [۷] مدلی عددی را با استفاده از نرم افزار مطلب (MATLAB) برای تقویت کننده‌های نوری نیمه هادی پهن باند ارائه نموده که در این پژوهش، رابطه بین انتشار خودبخودی و بهره ماده به وضوح مشخص گردیده و از آن می‌توان در نواحی کاری وسیعی استفاده نمود. از نتایج این مدل می‌توان برای بهینه سازی عملکرد تقویت کننده و بررسی تاثیر پارامترهای مختلف بر روی بهره و نویز تقویت کننده استفاده نمود.

در پژوهشی که توسط جینا و دیگران [۱۴] انجام گرفته، مدلی برای SOA ارائه شده است که نتایج دقیقی را هم برای تک کانال و هم برای انتقال WDM در سطوح اشباع اندک نشان داده است. آنها بیان کرده‌اند که تقویت کننده مورد استفاده دارای حداقل بهره ۱۲ dB، نویز فیگر ۱۰ dB و توان اشباع خروجی ۱۲ mW می‌باشد. لذا در راستای بکارگیری تقویت کننده‌های نوری نیمه هادی (SOA) در سیستمهای مخابرات نوری، نیازمند آن هستیم که راهکاری را برای بهینه سازی تقویت کننده‌های نوری پیدا نمائیم تا توان نویز انتشاری خودبخودی تقویت شده را کاهش داده و مسئله اشباع بهره را برای بهبود بهره در پهنای باند، تا میزان زیادی حل نماید.

۲-۶-۳ بکارگیری تقویت کننده‌های نوری نیمه هادی در سیستمهای مخابراتی دوربرد

در حال حاضر، دو نوع فناوری برای انتقال سیگنال به فواصل دوربرد مورد استفاده قرار می‌گیرند که هر دو سبب افزایش نرخ کلی اطلاعات در اتصالات نوری می‌گردند. این دو فناوری عبارتند از؛ مالتی پلکس با تقسیم زمانی^۱ (TDM) که نرخ بیت بالاتری را فراهم آورده و مالتی پلکس با تقسیم طول موج^۲ (WDM) که امکان انتقال کانالهای بیشتری را از طریق یک فیبر فراهم می‌آورد. هرچه که نرخ کلی اطلاعات بیشتر باشد، طراحی سیستم الکترونیکی پیچیده‌تر خواهد بود. از طرف دیگر، در سیستمهای WDM دستیابی به ظرفیت انتقال بالا، آسانتر از یک سیستم دارای یک طول موج در نرخ بیت بالاتر (TDM) است. این امر سبب آن شده که سیستمهای WDM رویکرد مؤثرتری برای فراهم نمودن شبکه‌ها و سیستمهای مخابرات نوری باند گسترده باشند [۳].

از تقویت کننده‌های نوری نیمه هادی (SOA) می‌توان به صورت قطعه‌ای کاربردی در سیستمهای مخابرات نوری دوربرد استفاده نمود. اما خصوصیات غیرخطی تقویت کننده‌های نوری که عبارتند از توان

1 - Time Division Multiplexing (TDM)

2 - Wavelength Division Multiplexing (WDM)

نویز انتشاری خودبخودی تقویت شده (ASE)، اشباع بهره، مدولاسیون بهره متقابل (XGM)، میکس چهار موج (FWM) و مدولاسیون فاز متقابل (XPM)، باعث محدود کردن کاربرد این تقویت کننده‌ها به صورت تقویت کننده‌های درون خطی در سیستمهای مخابراتی دوربرد می‌شود. این اثرات همچنین محدودیتهایی را برای کاربرد به صورت تقویت کننده‌های توان یا پیش تقویت کننده ایجاد می‌کنند. به علاوه، پژوهشهای بسیاری در راستای ارائه روشهای مقابله با مشکل ناحیه اشباع صورت پذیرفته است. در ادامه، اندکی به بررسی مقالات و پژوهشهای انجام گرفته در ارتباط با بکارگیری تقویت کننده‌های نوری نیمه هادی می‌پردازیم:

در پژوهشی که توسط آلسون [۲۱] انجام گرفته است، یک سیستم آشکارسازی همدوس با نرخ بیت ۴۰۰ مگابیت بر ثانیه و تا فاصله انتقال ۳۷۲ کیلومتر با استفاده از چهار تقویت کننده متوالی درون خطی با افت ۱/۵ دسی بل مورد بررسی قرار گرفته است. چویی و دیگران [۶] انتقال ۸ کانال با نرخ بیت ۱۰ گیگابیت بر ثانیه تا فاصله ۲۴۰ کیلومتری و کیم و دیگران [۱۶] انتقال ۴ کانال با نرخ بیت ۱۰ گیگابیت بر ثانیه تا فاصله ۵۰۰ کیلومتری را با استفاده از تقویت کننده‌های نوری نیمه هادی و با کمک تکنیک مدولاسیون طول موج گزارش کرده‌اند. اسپایکمن و دیگران [۲۶] انتقال ۸ کانال را با نرخ بیت ۲۰ گیگابیت بر ثانیه (۸ × ۲۰ Gb/s) تا فاصله انتقال ۱۶۰ کیلومتر با گستره ۴۷/۹ کیلومتری تقویت کننده‌های نوری نیمه هادی و با بهینه سازی پارامترهای طراحی سیستم انتقال گزارش نموده‌اند. این پژوهشگران همچنین انتقال ۸ کانال را با نرخ بیت ۴۰ گیگابیت بر ثانیه تا فاصله انتقال ۱۶۰ کیلومتری نشان داده‌اند. لازم به ذکر است که در این پژوهش‌ها از تقویت کننده‌های نوری نیمه هادی (SOA) به عنوان تقویت کننده‌های درون خطی برای سیستمهای تک کاناله و چند کاناله استفاده شده است [۲۶].

جینا و دیگران [۱۴] بکارگیری گسترده تقویت کننده‌های نوری نیمه هادی (SOA) را در انتقال نوری دوربرد به عنوان قطعه‌ای کاربردی توصیف نموده‌اند. خو و دیگران [۲۸] نیز انتقال ۸ کانال را با نرخ بیت ۴۰ گیگابیت بر ثانیه (۸ × ۴۰ Gb/s) تا فاصله انتقال ۱۶۰ کیلومتر نشان داده‌اند. سینگ و کالر [۲۵] نیز، انتقال ۱۰ کانال با نرخ بیت ۱۰ گیگابیت بر ثانیه و تا فاصله انتقال ۵۶۷۰ کیلومتر با فاصله کانالی ۲۰ گیگاهرتز را مورد ارزیابی و تحلیل قرار داده‌اند و با بهینه سازی پارامترهای تقویت کننده‌های نوری نیمه هادی، بهره سیستم انتقال را افزایش داده و نویز را به حداقل رسانیده‌اند. اما در این پژوهش، پارامتر طول عمر حاملها (τ_c) و ضریب انتشار خودبخودی (N_{sp}) ثابت فرض شده است. در حالیکه با بررسی منابع موجود در این زمینه، در می‌یابیم که این پارامترها به شدت وابسته به نرخ چگالی حامل می‌باشند. لذا در پژوهش حاضر، طول عمر حاملها و ضریب گسیل خودبخودی به صورت درست و وابسته به نرخ چگالی حامل در نظر گرفته شده و شبیه سازی ها بر این مبنا صورت پذیرفته است.

سون و دیگران [۲۷] انتقال بدون خطای ۳۲ کانال مالتی پلکس با تقسیم فشرده طول موج (DWDM) را با نرخ بیت ۲/۵ گیگاهرتز برثانیه ($2/5 \times 32 \text{ Gb/s}$) در طول ۱۲۵ کیلومتر با بکارگیری تقویت کننده‌های نوری نیمه هادی درون خطی چند طبقه نشان داده‌اند. خو و دیگران [۲۹] برای کاهش تداخل القا شده توسط تقویت کننده‌های نوری نیمه هادی در اتصالات WDM، طرح مدیریت پاشندگی را برای فاصله انتقال ۴۲۰ کیلومتر با گستره ۷۰ کیلومتری تقویت کننده‌های نوری نیمه هادی که سیگنال WDM را با نرخ بیت ۱۰۰ گیگاهرتز برثانیه با فرمت مدولاسیون^۱ RZ-OOK حمل می‌کنند، ارائه نموده‌اند. اما در فرمت‌های مرسوم مدولاسیون OOK، نظیر بازگشت به صفر و بدون بازگشت به صفر، اثر مدولاسیون بهره متقابل (XGM) در تقویت کننده نوری نیمه هادی باعث محدود کردن کارایی انتقال سیستم WDM می‌گردد [۶]. لذا از آنجا که مدولاسیون DPSK با فرمت بازگشت به صفر^۲، در مقایسه با فرمت مدولاسیون OOK، از مزایایی نظیر مقاوم‌تر بودن در برابر مدولاسیون بهره متقابل و یکسان بودن توان سیگنال برخوردار است، توجه بسیاری از پژوهشگران را به خود جلب کرده است. از اینرو، با اعمال این فرمت به لینک انتقال WDM مبتنی بر تقویت کننده‌های نوری نیمه هادی، می‌توان اثر مدولاسیون بهره متقابل (XGM) را کاهش داد [۲۸]. اونیشوگف و دیگران [۲۲]، انتقال تک کانال را با فرمت DBPSK در طول موج ۱۳۰۰ نانومتر در طول ۵۰۰ کیلومتر با استفاده از تقویت کننده‌های نوری نیمه هادی درون خطی گزارش کرده‌اند. در نهایت، لی و دیگران [۱۸] انتقال ۸ کانال با نرخ ۱۰ گیگاهرتز برثانیه را در طول ۱۰۵۰ کیلومتر و با استفاده از تقویت کننده های نوری نیمه هادی متوالی، توسط فرمت مدولاسیون DPSK با فاصله کانالی ۴۰۰ گیگاهرتز نشان داده‌اند. البته شایان ذکر است که پژوهشهای پیشمار دیگری در راستای بکارگیری تقویت کننده‌های نوری نیمه هادی در سیستمهای مخابراتی دوربرد صورت پذیرفته است، اما جهت جلوگیری از پراکندگی و گسترده تر شدن مطلب، از ذکر این موارد صرف نظر کرده و تمرکز خود را به معرفی همین پژوهشها معطوف می‌نمائیم.

۲-۶-۴ حساسیت گیرنده‌های نوری با تقویت کننده‌های نوری نیمه هادی

به طور کلی، گیرنده‌ای دارای حساسیت بیشتر است که عملکردی مشابه را هنگام دریافت توان نوری ورودی کمتر با حالتی که توان ورودی مطلوبی دریافت می‌کند، از خود نشان بدهد. معیار ارزیابی عملکرد گیرنده‌های نوری، میزان نرخ خطای بیت است. بنابراین، نیازمند بهبود حساسیت گیرنده و پهنای باند برای دستیابی به توانایی انتقال بیشتر می‌باشیم. گیرنده‌های که از ساختار فوتو دیود بهمنی (APD) بهره می‌برند، دارای حساسیت بسیار زیاد $-29/5 \text{ dBm}$ در نرخ بیت ۱۰ گیگاهرتز برثانیه هستند و مزایای زیادی نسبت به گیرنده‌های p-i-n در نرخ بیت‌های بالا دارند. اما در نرخ بیت‌های بالاتر، حاصل ضرب بهره در پهنای باند این

1 - Return to Zero On-Off Keying Modulation (RZ-OOK)

2 - Return To Zero Differential Phase Shift Keying (RZ-DPSK)

فوتودیودها، باعث محدود شدن حساسیت می‌گردد. لذا می‌بایست از پیش تقویت کننده‌های نوری برای بهبود حساسیت گیرنده‌های نوری استفاده کرد. تقویت کننده‌های نوری نیمه هادی (SOA) در مقایسه با تقویت کننده‌های فیبر آلایش شده با اربیموم (EDFA) یکپارچگی بیشتر و هزینه اندکی دارند. لذا جهت استفاده به عنوان پیش تقویت کننده، بسیار مناسب می‌باشند. آلسون و دیگران [۲۰] گیرنده‌ای را با پیش تقویت کننده نوری نیمه هادی توصیف کرده‌اند که حساسیت $-34/3$ dBm را در نرخ بیت ۴ گیگابیت بر ثانیه بدون استفاده از فیلتر نوری از خود نشان داده است.

۲-۶-۵ بکارگیری تقویت کننده‌های نوری نیمه‌هادی در شبکه‌های نوری

شبکه‌های نوری را می‌توان به دو دسته شبکه‌های فعال و غیرفعال تقسیم نمود. هنگامی سیگنال به صورت اپتوالکترونیکی بازتولید یا تقویت می‌گردد، شبکه را فعال نامیده و در غیر این صورت، شبکه غیرفعال است. در شبکه‌های غیرفعال، توان نوری انتقالی برای توزیع بین گیرنده‌ها تقسیم می‌شود. بنابراین افزایش تعداد کاربران، این امر را ایجاب می‌نماید که هر گیرنده، میزان کمتری توان نوری را در صورت ثابت بودن سطح توان ارسالی، دریافت کند و این کاهش در سطح توان دریافتی باعث تنزل کارایی گیرنده می‌گردد. از این رو برای بالا نگه داشتن میزان کارایی گیرنده، می‌بایست تعداد کاربران را کاهش داد. لذا برای جلوگیری از کاهش تعداد کاربران، نیازمند تقویت کننده‌های نوری پر قدرت و با بازدهی بالا برای حفظ کارایی گیرنده می‌باشیم. در راستای افزایش ظرفیت انتقال شبکه‌های نوری، از تکنیک‌های مالتی پلکسینگ و سوئیچینگ نوری استفاده می‌نمائیم [۲]. در سیستمهای مالتی پلکس با تقسیم طول موج، طیف نوری در کانالهای متعددی تقسیم می‌گردد. این کانال‌ها در طول موج‌های متفاوتی تمرکز می‌یابند تا از تداخل کانال‌ها با یکدیگر جلوگیری شود.

برای پیاده سازی شبکه‌های WDM، به عناصری نظیر تزویج کننده، مالتی پلکسر و دی مالتی پلکسر طول موج، منابع دارای طول موج ثابت یا قابل تنظیم و آشکارسازهایی که قادر به عملکرد در کل محدوده طول موج باشند، نیاز داریم. از آنجا که پیاده سازی دیکدر، اینکدر، مالتی پلکسر و دی مالتی پلکسر در شبکه های مالتی پلکس با تقسیم زمانی (TDM) در نرخ بیت بالا (ترایت بر ثانیه) بسیار دشوار است، لذا از روش مالتی پلکس با تقسیم طول موج (WDM) استفاده می‌نمائیم که پیاده سازی آن بسیار راحت بوده و همچنین پهنای باند بزرگی را نیز فراهم می‌آورد. مقالات متعددی در زمینه پیاده سازی شبکه‌های WDM ارائه شده است. در این شبکه‌ها، کاربران سیستم می‌بایست بسیار زیاد باشند تا بتوان از تمام پهنای باند در دسترس، استفاده نمود. همچنین باید حداقل فیبرنوری را مورد استفاده قرار داد. در این شبکه‌ها، افت بین فرستنده تا گیرنده به شدت اندک است، لذا تعداد کاربران زیادی را می‌توان پشتیبانی نمود. همچنین می‌بایست تعداد

تزویج کننده‌ها، مالتی پلکسرها، فرستنده‌ها، گیرنده‌ها، تقویت کننده‌های نوری و میزان توان ورودی را به حداقل ممکن رساند [۲].

۶-۶-۲ چیدمان تقویت کننده‌های نوری در شبکه‌های نوری

مسئله چیدمان تقویت کننده‌های نوری در شبکه‌های مخابراتی، مستقیماً تعداد کاربران و فاصله انتقال را در این شبکه‌ها و سیستمها تخمین می‌زند. عملکرد گیرنده در شبکه‌های نوری، با استفاده از تقویت کننده‌های نوری و بدون استفاده از آنها تغییر می‌نماید. از تقویت کننده‌های نوری می‌توان در شبکه‌های غیرفعال جهت افزایش تعداد کاربران استفاده نمود [۲]. برای دستیابی به بهینه‌ترین عملکرد تقویت کننده می‌بایست دو نکته را مد نظر قرار داد؛ نخست؛ چیدمان صحیح تقویت کننده‌ها در شبکه و دوم اینکه شبکه‌های موجود را جهت بکارگیری مؤثرتر تقویت کننده‌ها اصلاح نمائیم. از این تقویت کننده‌ها می‌توان برای یکسان نمودن توزیع سطح توان دریافتی استفاده نمود که این امر، باعث افزایش چشمگیر تعداد کاربران خواهد شد. با استفاده از تقویت کننده‌های نوری نیمه هادی می‌توان به شبکه‌ای با توزیع یکسان توان بین کاربران دست یافت. در جدول (۲-۲) تاریخچه مختصری از بکارگیری تقویت کننده‌های نوری در سیستمهای مخابراتی دوربرد و افزایش تدریجی فاصله انتقال را تا سال ۲۰۰۷ مشاهده می‌نمائیم.

تقویت کننده‌های نوری نیمه هادی را می‌توان به سادگی با تراشه گیرنده و فرستنده یکپارچه نمود، لذا این تقویت کننده‌ها جهت استفاده به صورت پیش تقویت کننده (پیش از گیرنده) و تقویت کننده توان (پس از فرستنده) بسیار مناسب می‌باشند. از خصوصیات غیرخطی تقویت کننده‌های نوری نظیر؛ FWM، XGM و XPM می‌توان برای شکل دهی مبدل‌های طول موج^۱ نیز استفاده نمود. مبدل‌های طول موج تماماً نوری، عنصری کلیدی برای شبکه‌های نوری نسل آینده خواهند بود. این مبدل‌ها انسداد طول موج را که در اتصالات متقاطع در شبکه‌های WDM بوجود می‌آید، از بین برده و انعطاف پذیری و ظرفیت شبکه‌های مخابراتی را افزایش می‌دهند [۸].

مبدل‌های الکترواپتیک، ساده ترین ابزار برای تبدیل طول موج هستند. اما این مبدل‌ها محدودیتهایی نظیر مصرف توان بسیار زیاد و پیچیدگی بیش از حد دارند. در نتیجه در راستای غلبه بر این محدودیتها در چند سال اخیر، پژوهشهایی در زمینه بکارگیری تقویت کننده‌های نوری نیمه هادی (SOA) و لیزرهای نیمه هادی برای تبدیل طول موج، صورت گرفته است. همانطور که بیان گردید، از تقویت کننده‌های نوری نیمه هادی در مدهای عملکردی مدولاسیون بهره متقابل (XGM)، مدولاسیون فاز متقابل (XPM) و میکس چهار موجی (FWM)، جهت تبدیل طول موج استفاده می‌نمایند. البته توان ورودی در این مبدل‌ها باید به اندازه

کافی زیاد باشد تا تقویت کننده را اشباع نماید. زیرا همانطور که بیان شد، تقویت کننده برای عملکرد در این مدها می‌بایست اشباع شده باشد [۹].

جدول ۲-۲: روند افزایش فاصله انتقال با استفاده از تقویت کننده‌های نوری [۱، ۲، ۳ و ۱۳]

سال میلادی	نوع تقویت کننده	نرخ بیت	فاصله انتقال
۱۹۸۷	تقویت کننده بریلوئن	۱۰۰ Mb/s	۳۰ کیلومتر
۱۹۸۹	SOA	۴۰۰ Mb/s	۳۷۲ کیلومتر
۱۹۹۱	FPA	۵ Gb/s	۱۴۰۰۰ کیلومتر
۱۹۹۳	EDFA	۱/۸ Gb/s	۱۵۰۰۰ کیلومتر
۱۹۹۳	SOA	۴ × ۱۰ Gb/s	۴۰ کیلومتر
۱۹۹۴	EDFA	۱۶ × ۱۰ Gb/s	۱۴۲۰ کیلومتر
۱۹۹۵	SOA	۱۰ Gb/s	۵۰۰ کیلومتر
۱۹۹۷	EDFA	۲/۵ Gb/s	۹۰۰۰ کیلومتر
۱۹۹۷	SOA	۱۰ Gb/s	۳۵۰۰ کیلومتر
۱۹۹۹	SOA	۸۰ Gb/s	۵۰ کیلومتر
۱۹۹۹	EDFA	۸ × ۴۰ Gb/s	۳۶۷ کیلومتر
۲۰۰۰	SOA	۸ × ۲۰ Gb/s	۱۶۰ کیلومتر
۲۰۰۳	SOA	۸ × ۴۰ Gb/s	۱۶۰ کیلومتر
۲۰۰۴	SOA	۱۰ × ۱۰ Gb/s	۴۲۰ کیلومتر
۲۰۰۴	SOA	۸ × ۱۰ Gb/s	۱۰۵۰ کیلومتر
۲۰۰۵	EDFA	۳۲۰ Gb/s	۳۲۰ کیلومتر
۲۰۰۷	SOA	۱۰۰ Gb/s	۵۶۷۰ کیلومتر

۲-۷ گزینش حوزه پژوهش

همانطور که بیان شد، در سیستمهای مخابرات فیبرنوری با افزایش فاصله انتقال، شاهد افت توان در سیگنال ارسالی هستیم. تعداد کاربران را می‌توان یا با افزایش توان ارسالی و یا با کاهش تلفات در شبکه با

استفاده از بازتولید کننده‌های اپتوالکترونیکی^۱ افزایش داد. در این بازتولید کننده‌ها، سیگنال نوری ابتدا به جریان الکتریکی تبدیل شده و سپس توسط یک فرستنده بازتولید می‌گردد. اما چنین روش بازتولیدی برای سیستمهای مالی پلکس با تقسیم طول موج (WDM) کاملاً پیچیده و پرهزینه خواهد بود.

روش بازتولید الکترونیکی همچنین قابلیت اطمینان شبکه را به شدت کاهش می‌دهد. بنابراین، توسعه و پیشرفت شبکه‌های WDM چند کاناله، نیازمند بکارگیری تقویت کننده‌های نوری است که سیگنال نوری را مستقیماً و بدون تبدیل به حوزه الکتریکی تقویت نمایند. به چنین تقویت کننده‌هایی، تقویت کننده‌های درون خطی^۲ گفته می‌شود چرا که سبب حذف محدودیت‌های ناشی از افت سیگنال شده و آن را مستقیماً تقویت می‌نمایند. تقویت کننده‌های نوری به دلیل قادر بودن به تقویت همزمان تمامی کانال‌ها به طور گسترده‌ای در سیستمهای نوری WDM مورد استفاده قرار می‌گیرند. با گمارش این تقویت کننده‌ها پس از فرستنده و پیش از گیرنده، می‌توان توان ارسالی را افزایش داد. از آنجا که نیاز به فاصله انتقال دوربرد بدون تکرار و انتقال سیگنال با پهنای باند گسترده، به سرعت در حال افزایش است، لذا می‌بایست روشهای انتقال پیشرفته‌تری را مورد کاوش قرار داد.

در راستای نیل به این اهداف، مهمترین مسئله این است که بتوانیم تقویت کننده‌های نوری نیمه هادی و سپس نحوه چیدمان آنها را در شبکه‌های نوری بهینه نمائیم. بنابراین مطالعه، تحلیل و بهینه سازی تقویت کننده‌های نوری در شبکه‌های مخابرات نوری WDM، جهت بهبود توان ارسالی برای افزایش تعداد کاربران از اهمیت بالایی برخوردار است. با بررسی پژوهشهای پیشین و ارزیابی نتایج آنها در می‌یابیم که بهینه سازی تقویت کننده‌های نوری نیمه هادی در سیستمهای مخابراتی و افزایش توان و کاهش نویز این تقویت کننده ها نقش بسزایی در بهبود عملکرد سیستمهای نوری دوربرد ایفا می‌نماید.

لذا در این پایان نامه، سعی بر آن است که با توسعه برخی از فعالیتهای که تا کنون در این زمینه انجام شده، تقویت کننده‌های نوری نیمه هادی را برای افزایش توان ارسالی و کاهش نویز انتشاری در نرخ بیت ۱۰ گیگابیت بر ثانیه برای سیستم DWDM با فاصله کانالی ۲۰ گیگاهرتز بهینه نمائیم که این امر با ارائه مدلی برای بررسی رفتار تقویت کننده، تکمیل شده و در نهایت با استفاده از گستره‌های تقویتی متشکل از چند کیلومتر فیبر تک مد، چند کیلومتر فیبر جبران کننده پاشندگی و یک تقویت کننده نوری نیمه هادی بهینه شده (با استفاده از مدل ارائه شده) به عنوان تقویت کننده درون خطی برای سیستمهای نوری DWDM دوربرد، انتقال سیگنال به فواصل دوربرد را مورد ارزیابی و تحلیل قرار داده و نتایجی بهینه نسبت به سایر پژوهشها ارائه دهیم.

1 - Optoelectronic Regenerator
2 - In-Line

فصل سوم : مواد و روش‌ها

۳-۱ مقدمه

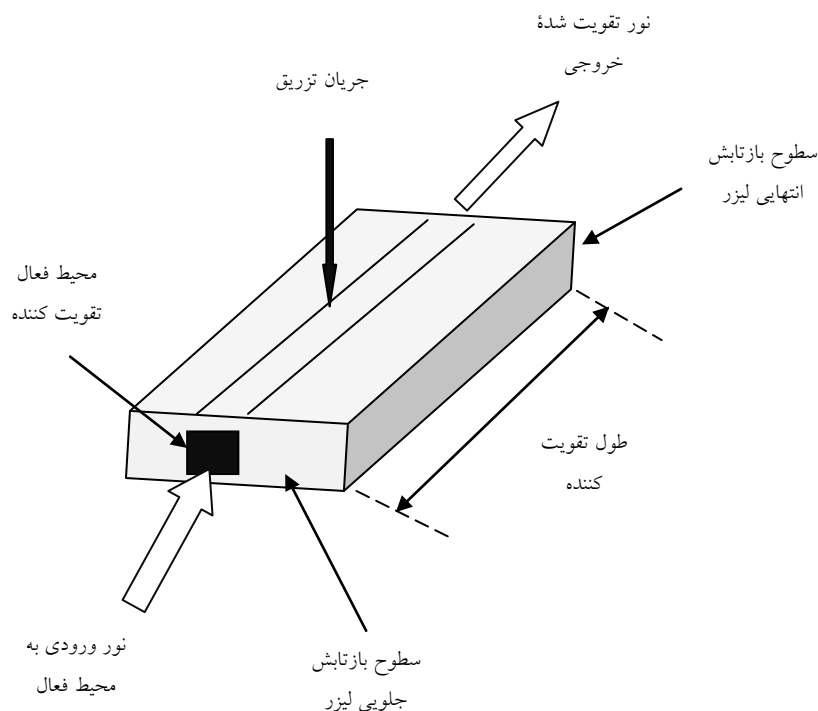
در این فصل قصد داریم، ابتدا به معرفی ساختار بنیادی پژوهش پرداخته، اصول و مبانی تحلیلی و ریاضی مورد استفاده در این پژوهش را بیان نموده و شبیه سازی‌ها را بر مبنای این اصول انجام دهیم و در فصل بعدی به بیان نتایج حاصل از این شبیه سازی‌ها خواهیم پرداخت. لذا ابتدا ساختار تقویت کننده مورد استفاده را معرفی کرده و بحث را با توضیح و تفسیر پیرامون مسائل مربوط به این ساختار ادامه می‌دهیم. سپس با توجه به ضرورت بهینه سازی تقویت کننده‌های نوری نیمه هادی، مدلی را که برای بررسی رفتار تقویت کننده و تحلیل پارامترهای کلیدی آن، با بکارگیری روش تفاضل محدود^۱ معرفی کرده و اعتبار آن را بررسی خواهیم نمود. لذا تمرکز این فصل، بر روی مدل سازی و تحلیل تقویت کننده های نوری نیمه هادی (SOA) برای سیستم های مخابرات نوری DWDM چند کاناله است. این بخش کاملاً با نخستین هدف این پژوهش در ارتباط است.

از طرفی، همانطور که بیان شد در بیشتر مقالات ارائه شده، از بهینه سازی پارامترهای ساختاری تقویت کننده نوری نیمه هادی صرف‌نظر شده است. لذا در این پژوهش قصد داریم که با بهینه سازی جریان بایاس تقویت کننده نوری نیمه هادی، طول تقویت کننده و ... بتوانیم عملکرد سیستم‌های مخابرات نوری DWDM چند کاناله را بهبود بخشیم. نکته‌ای که به ذهن پژوهنده می‌رسد این است که در بیشتر پژوهش‌های پیشین، تقویت کننده مورد استفاده یا به صورت تجربی معرفی گردیده، سپس بهینه شده و در سیستم مخابراتی مورد ارزیابی و تحلیل قرار گرفته و یا در تحلیل و شبیه سازی اثرات تقویت کننده از بعضی از پارامترها صرف‌نظر شده و همچنین بعضی از پارامترها ثابت در نظر گرفته شده‌اند.

لذا از آنجا که دسترسی به تقویت کننده‌های عملی و بررسی رفتار آنها به صورت تجربی برای پژوهنده امکان پذیر نبوده است، در این رساله سعی شده است که با شبیه سازی و ارائه مدلی برای بررسی و تحلیل رفتار تقویت کننده، بتوان در راستای بهینه سازی سیستم‌های مخابراتی DWDM دوربرد گامی نوین برداشت. شایان ذکر است که تا جای ممکن سعی شده که پارامترهای کلیدی مورد استفاده از منابع تجربی استخراج گردد تا به واقعیت نزدیکتر باشد و همچنین پارامترهایی نظیر طول عمر حاملها و ضریب انتشار خودبخودی نیز که در اکثر پژوهشها برای راحتی کار، ثابت فرض می‌شود، در این رساله دقیق و وابسته به چگالی حامل فرض شده تا مدل ارائه شده اعتبار بیشتری داشته و شبیه سازی‌ها به واقعیت نزدیکتر باشد.

۲-۳ ساختار تقویت کننده نوری نیمه هادی مورد نظر

در شکل (۱-۳) ساختار یک تقویت کننده نوری نیمه هادی موج رونده (TW - SOA) را مشاهده می‌نمائیم. همانطور که بیان گردید این تقویت کننده در حقیقت همان لیزر نیمه هادی است که سطوح انعکاسی آن با پوشش ضد بازتابش، پوشانده شده و یک موج برنوری درون پیوند P/N دیود لیزری شکل گرفته است. هنگامی که تقویت کننده، توسط جریان الکتریکی بایاس می‌گردد، الکترونهای لایه فعال آن انرژی زیادی جذب می‌نمایند، از این رو باندهای ظرفیت و هدایت (سطوح انرژی) که به ترتیب متشکل از حفره‌ها و الکترونها هستند شکل می‌گیرند.



شکل ۳ - ۱: ساختار بنیادی یک تقویت کننده نوری نیمه هادی موج رونده

شکل گیری چنین باندهای انرژی باعث ایجاد سه مکانیزم تشعشعی درون تقویت کننده می‌گردد که در ادامه به اختصار بیان خواهیم نمود [۱۰]:

الف- گسیل خودبخودی^۱: فرآیندی است که هنگامی که یک الکترون از باند هدایت به باند ظرفیت گذار می‌کند، سبب ایجاد فوتون یا آزاد شدن انرژی گرمایی می‌گردد. این فرآیند را به عنوان تلفات یا نویز می‌شناسیم، چرا که فوتون تولیدی در راستایی دیگر و با فازی متفاوت با فوتون ورودی انتشار می‌یابد.

ب- جذب تحریک شده^۱ (القایی): فرآیندی است که در آن، الکترونی که در باند ظرفیت قرار دارد از فوتون تابشی به میزان کافی انرژی دریافت می‌نماید تا به راحتی به باند هدایت گذار نموده و باعث ایجاد تلفات گردد.

ج- گسیل تحریک شده^۲ (القایی): این فرآیند زمانی رخ می‌دهد که پرتو نور ورودی به موج بر فعال درون تقویت کننده نوری نیمه هادی وارد شود. در این هنگام، فوتون ورودی به یک الکترون تحریک شده در باند هدایت، برخورد نموده و باعث تولید فوتون تحریکی با راستا، فاز و فرکانسی مشابه با فوتون تابشی می‌گردد. لذا با برخورد نور ورودی با تعداد الکترونهای تحریک شده بیشتر در باند هدایت، سیگنال ورودی تقویت می‌گردد. همانطور که بیان شد، جهت تقویت سیگنال می‌بایست وارونگی جمعیت رخ دهد که در اینجا این عمل با افزایش تعداد الکترونهای باند هدایت (باند بالایی) نسبت به باند ظرفیت (باند پائینی) صورت می‌پذیرد و کاهش تعداد الکترونهای تحریک شده در باند هدایت (چگالی حامل)، باعث کاهش بهره تقویت کننده می‌گردد. چرا که بهره مستقیماً با چگالی حامل متناسب است. با اشاره به تحلیل های پیشین درمی‌یابیم که پدیده نخست همان نویز انتشاری خودبخودی است، پدیده دوم تلفات و پدیده سوم ضریب تقویت را تشکیل می‌دهد.

از طرفی، هر تقویت کننده، پارامترهای ساختاری و کمیتهایی دارد، لذا در راستای ارزیابی و تحلیل آن می‌بایست این پارامترها را به خوبی بشناسیم. در جدول (۳-۱) پارامترهای ساختاری تقویت کننده‌های نوری نیمه هادی و تعاریف هر یک لیست شده است. در راستای مدل سازی و شبیه سازی تقویت کننده برخی از پارامترها را از منابع موجود استخراج کرده و برخی را با شبیه سازی برای بهترین عملکرد محاسبه خواهیم نمود. همانطور که در جدول می‌بینیم، پارامترهایی نظیر ضرایب بازترکیب غیر تشعشعی، تشعشعی و اوزه به شدت وابسته به ساختار تقویت کننده بوده و همانطور که در تحلیل بیان خواهیم نمود، طول عمر حاملها را کنترل می‌نمایند. مهمترین هدف در این فصل این است که به مقادیر بهینه‌ای برای جریان بایاس تقویت کننده، طول تقویت کننده و برخی دیگر پارامترها دست یابیم تا بتوان رفتار تقویت کننده را شبیه سازی نمود و مدلی را برای بررسی این رفتار ارائه نمائیم.

۳-۳ تحلیل تقویت کننده‌های نوری نیمه هادی در برخورد با سیگنال نوری

همانطور که در بخش‌های پیشین نیز بیان شد، تقویت کننده‌های نوری نیمه هادی به علت داشتن خصوصیتی نظیر ساین کوچک، طیف بهره بسیار وسیع، مصرف توان اندک، سادگی یکپارچه شدن با دیگر ادوات و هزینه اندک، در مقایسه با تقویت کننده های فیبرنوری برای کاربرد در سیستم‌های انتقال فیبرنوری

1 - Stimulated Absorption

2 - Stimulated Emission

ترجیح داده می‌شوند [۲۵]. لذا در راستای بکارگیری تقویت کننده‌های نوری نیمه هادی برای کاربردهای مختلفی نظیر تبدیل طول موج، سوئیچینگ، تقویت کننده‌های درون خطی و پیش تقویت کننده، نیازمند بهینه سازی این تقویت کننده‌ها می‌باشیم. بنابراین در این بحث، ابتدا اشباع بهره و توان نویز انتشاری خودبخودی تقویت شده^۱ (ASE) را به صورت ساده مورد تحلیل و بررسی قرار داده، سپس معادلاتی را که مبنای مدل سازی آن می‌باشد، مورد ارزیابی قرار خواهیم داد.

جدول ۳ - ۱: پارامترهای ساختاری تقویت کننده‌های نوری نیمه هادی

پارامتر	نام لاتین و مشخصه آن	محدوده تقریبی تغییرات و واحد کمیت
جریان تزریق (جریان بایاس)	Injection Current [I]	۱۵۰ تا ۶۰۰ میلی آمپر
طول تقویت کننده	Length of Amplifier [L]	۵۰۰ تا ۱۵۰۰ میکرومتر
عرض ناحیه فعال	Width of Active Region [w]	۱ تا ۴ میکرومتر
ضخامت لایه فعال	Thickness of Active Layer [d]	۸۰ نانومتر تا ۴ میکرومتر
ضریب تحدید نوری	Confinement Factor [Γ]	۰/۳ تا ۰/۵
ضریب تلفات داخلی (تلفات ماده)	Material Loss [α_p]	۱۰۰۰ تا ۴۰۰۰ واحد بر متر
بهره تفاضلی	Differential Gain [α_g]	1×10^{-20} تا $2/78 \times 10^{-20}$ متر مربع
بازدهی تزویج ورودی و خروجی	Input Output Coupling Efficiency [α_{int}]	۳ دسی بل
چگالی حامل در گذار	Carrier Density at Transparency [N_t]	$1 \times 10^{+24}$ تا $1/5 \times 10^{+24}$ بر متر مکعب
ضریب بازترکیب غیر تشعشعی	Non - Radiative Recombination Coefficient [A_{nr}]	وابسته به ساختار تقویت کننده (s^{-1})
ضریب بازترکیب تشعشعی	Radiative Recombination Coefficient [B_{rad}]	وابسته به ساختار تقویت کننده (m^3/s)
ضریب بازترکیب اوزه	Auger Recombination Coefficient [C_{aug}]	وابسته به ساختار تقویت کننده (m^6/s)

۳-۳-۱ تحلیل استاتیک تقویت کننده

اگر منبع نوری در دسترس، لیزر موج پیوسته یا لیزری پالسی باشد که مدت زمان پالس تولیدی آن بیش از طول عمر حاملها باشد، می‌توان تغییرات چگالی حامل را نسبت به زمان، صفردر نظر گرفت ($\frac{dN}{dt}=0$) و تقویت کننده را در حالت ماندگار از لحاظ استاتیک، تحلیل نمود. لذا در اشباع بهره،

هنگامی که توان ورودی تقویت کننده (P_{in}) با توان اشباع (P_s) قابل مقایسه می گردد، بهره تقویت کننده (g)، کاهش یافته، لذا ضریب تقویت (G) نیز با کاهش توان سیگنال، کاهش می یابد [۳]:

$$g.P = \frac{\partial P}{\partial z} = \frac{g_0}{1 + \frac{P_{in}}{P_s}}.P \quad (۱-۳)$$

که g_0 بهره سیگنال کوچک بوده و توسط معادله زیر بدست می آید [۳]:

$$g_0 = (\Gamma \alpha_g) (I \tau_c / qV - N_t) \quad (۲-۳)$$

پارامترهای بکار رفته در این رابطه، عبارتند از: Γ ضریب تحدید نوری^۱، α_g بهره تفاضلی^۲، V حجم فعال، I جریان بایاس، τ_c طول عمر حامل^۳، q بار الکترون و N_t چگالی حامل در گذار^۴ [۳].
لذا بهره اشباع نشده تقویت کننده برابر خواهد بود با [۱۳]:

$$G_0 = \exp(g_0.L)$$

که L طول تقویت کننده نیمه هادی است. با استفاده از شرایط اولیه $P(0)=P_{in}$ و $P(L) = P_{out} = G.P_{in}$ رابطه بهره تقویت سیگنال بزرگ برابر خواهد بود با [۳]:
(۳-۳)

هنگامی که توان ورودی تقویت کننده نوری نیمه هادی بیش از مقدار اشباع شود، تقویت کننده به اشباع رفته و بهره نیز توسط معادله زیر کنترل می شود [۳]:

$$G = G_0 \exp\left(-\frac{G-1}{G} \frac{P_{out}}{P_s}\right) \quad (۴-۳)$$

این معادله نشان می دهد که ضریب تقویت، هنگامی که P_{out} با P_s قابل مقایسه می شود، از مقدار غیر اشباع خودش یعنی G_0 کاهش می یابد. همچنین با تحلیل رابطه (۴-۳) در می یابیم که با کاهش G به سمت G_0 ، ضریب تقویت کاهش می یابد، لذا با افزایش توان سیگنال ورودی، ضریب تقویت منفی می گردد که این امر مطلوب نیست. بنابراین اشباع بهره، نه تنها باعث کاهش بهره تقویت کننده می شود، بلکه باعث اعمال اثرات غیرخطی می گردد که تداخل بین کانالی را در سیستم انتقال چند کاناله افزایش می دهد. مهمترین نکته حائز اهمیت این است که در تقویت کننده های نوری نیمه هادی، همزمان با تقویت سیگنال، نویز انتشاری که مهمترین منبع تولید نویز (ناشی از گسیل خودبخودی) در این تقویت کننده ها است نیز تقویت می گردد. لذا با استناد به [۲۱] توان نویز انتشاری خودبخودی تقویت شده در خروجی تقویت کننده نوری نیمه هادی به صورت زیر نوشته می شود:

1 - Confinement Factor
2 - Differential Gain
3 - Carrier Lifetime
4 - Transparency carrier Density

$$P_{ASE} = P_{sp} = N_{sp}(G-1)h\nu B_0 \quad (6-3)$$

بنابراین، جریان نوری هم ارز با توان انتشار یافته خودبخودی برابر است با [۲۶]:

$$i_{sp} = \frac{P_{sp}q}{h\nu} = N_{sp}(G-1)qB_0 \quad (7-3)$$

در این رابطه N_{sp} ، ضریب انتشار خودبخودی^۱ (ضریب وارونگی جمعیت) می باشد.

از طرفی در هر تقویت کننده نوری نیمه هادی سه نوع منبع نویز وجود دارد: نویز شات (N_{shot})، نویز ضربه ای سیگنال به انتشار خودبخودی (N_{sig-sp}) و نویز ضربه ای انتشار خودبخودی به خودبخودی (N_{sp-sp}). که هر سه به جریان نوری هم ارز با توان ورودی وابسته بوده و توسط روابط زیر بدست می آیند [۲۱ و ۳۰]:

$$N_{shot} = 2B_e q i_{sp}$$

$$N_{sig-sp} = \frac{4GI_s \eta_{in} \eta_{out}^2 i_{sp} L_l^2 B_e}{B_0}$$

$$N_{sp-sp} = \frac{i_{sp}^2 B_e (2B_0 - B_e)}{m B_0^2} \quad (8-3)$$

در این روابط، B_e پهنای باند الکتریکی؛ m تعداد مدهای قطبش؛ I_s جریان نوری هم ارز با توان ورودی تقویت کننده؛ η_{in} و η_{out} به ترتیب، بازدهی تزویج ورودی و خروجی تقویت کننده؛ L_l ، افت نوری بین تقویت کننده و گیرنده و N_{th} ، نویز حرارتی^۲ گیرنده می باشد. بنابراین نویز کلی برابر است با [۲۵]:

$$N_{tot} = N_{shot} + N_{sig-sp} + N_{sp-sp} + N_{th} \quad (9-3)$$

همچنین نویز فیگر حاصل از ضریب انتشار خودبخودی برابر خواهد بود با [۳]:

$$F_n = \frac{2N_{sp}(G-1)}{G} \quad (10-3)$$

از تحلیل فوق در می یابیم که در مقادیر اندک جریان بایاس، ضریب تقویت، با افزایش توان سیگنال ورودی، کاهش می یابد. حتی اگر توان نویز انتشاری خودبخودی تقویت شده، نویز کلی و نویز فیگر هم به شدت اندک باشند، باز هم توان خروجی افت می نماید. همچنین در می یابیم که برای مقادیر زیاد جریان بایاس، حتی اگر توان ورودی بیش از توان اشباع باشد، توان نویز انتشاری تقویت شده، نویز کلی و نویز فیگر، با افزایش بهره، تقویت می گردند. که این امر باعث افزایش تداخل بین کانالی در سیستم انتقال چند کاناله می شود.

1 - Spontaneous Emission Factor
2 - Thermal Noise

نکته حائز اهمیت است که همانطور که بیان شد در اکثر پژوهشهای پیشین، جهت سادگی کار به همین تحلیل استاتیک بسنده کرده و شبیه سازی‌ها بر مبنای همین اصول صورت پذیرفته است [۱۴ و ۲۵]. اما با بررسی چندین مقاله تجربی و شبیه سازی‌های انجام شده [۷، ۵، ۱۰ و ۱۲] در ارتباط با مدل سازی تقویت کننده‌های نوری نیمه هادی و بکارگیری در سیستمهای DWDM در می‌یابیم که این نمونه تحلیل استاتیک، دور از واقعیت بوده و جهت تحلیل تقویت کننده و ارائه مدلی معتبر می‌بایست به نحو دیگری عمل نمود و تقویت کننده را از نقطه نظر چگالی حامل، تحلیل و پارامترها و کمیتهای آن را با توجه به تغییرات چگالی حامل محاسبه نمود. چرا که عملکرد این تقویت کننده‌ها به شدت وابسته به تغییرات نرخ چگالی حامل بوده که خود این نرخ نیز وابسته به تغییرات توان ورودی و جریان بایاس تقویت کننده می‌باشد.

لذا با بکارگیری مبانی گفته شده در این فصل و فصل گذشته، تحلیل دقیقتری را برای تقویت کننده ارائه می‌نمائیم و از آن برای مدل سازی استفاده خواهیم نمود. نکته مهم دیگر این است که در تحلیل ساده، می‌بایست طول عمر حاملها (τ_c) و ضریب انتشار خودبخودی (N_{sp}) را ثابت فرض کرد ولی با تحلیل دقیقتر در می‌یابیم که این پارامترها به شدت به نرخ چگالی حامل وابسته بوده و نمی‌توان آنها را ثابت فرض نمود.

۳-۲-۳ تحلیل تقویت کننده از نقطه نظر تغییرات چگالی حامل

در راستای شبیه سازی رفتار تقویت کننده‌های نوری نیمه هادی در سیستمهای مخابراتی، نیازمند آن هستیم که معادله‌ای را که نرخ چگالی حامل را درون محیط فعال کنترل می‌نماید، محاسبه نموده و پارامترهایی نظیر ضریب تقویت، توان نویز انتشاری خودبخودی و بهره نوری را استخراج نمائیم. روشی که ما برای شبیه سازی رفتار تقویت کننده برگزیده‌ایم، به نام سگمنت سازی تقویت کننده شناخته می‌شود. در این روش، تقویت کننده را به قسمت های مساوی تقسیم نموده و چگالی حامل را درون سگمنت، یکسان فرض می‌نمائیم، در حالیکه چگالی حامل از یک سگمنت به سگمنت دیگر، متناسب با توان ورودی آن و چگالی حامل سگمنت قبلی تغییر می‌نماید [۱۰ و ۱۲].

نرخ چگالی حامل^۱

هنگامی که نور به داخل تقویت کننده تزریق می‌گردد، تغییراتی در چگالی حامل و فوتونها درون ناحیه فعال رخ می‌دهد، که این تغییرات را می‌توان توسط معادله نرخ، توصیف نمود. لذا ابتدا تحلیل را از بهره ماده آغاز می‌نمائیم، چرا که محیط بهره تقویت کننده توسط ضریب بهره ماده^۲ (g_m) توصیف می‌گردد، که خود این پارامتر نیز به چگالی حامل (N) وابسته [۷، ۱۰ و ۱۳]:

1 - Carrier Population Rate
2 - Material Gain Coefficient

$$g_m = \alpha_g (N - N_t) \quad (11-3)$$

لذا ضریب بهره خالص^۱ (g_T) که وابسته به g_m می باشد نیز به صورت زیر تعریف می گردد [۸]:

$$g_T = (\Gamma \cdot g_m) - \alpha_p \quad (12-3)$$

در این رابطه، α_p تلفات پراکندگی داخلی موج بر^۲ (افت ماده) می باشد. بدین ترتیب، ضریب تقویت موج نوری در فاصله z از ابتدای تقویت کننده برابر است با [۷ و ۱۰]:

$$G(z) = \exp(g_T \cdot z) \quad (13-3)$$

از طرفی، متوسط توان خروجی (P_{ave}) تقویت کننده نوری نیمه هادی برابر خواهد بود با [۱۰]:

$$P_{ave} = \frac{1}{L} \int_0^L P_{in} G(z) dz \quad (14-3)$$

بنابراین با انتگرال گیری حول طول تقویت کننده داریم [۱۰]:

$$P_{ave} = P_{in} \frac{e^{g_T \cdot L} - 1}{g_T \cdot L} \quad (15-3)$$

لذا معادله دینامیکی که نرخ تغییرات چگالی حامل را درون محیط فعال، کنترل می کند، به صورت زیر تعریف می گردد [۳، ۸ و ۱۰]:

$$\frac{dN}{dt} = \frac{I}{q \cdot V} - R(N) - \frac{\Gamma \cdot g_m \cdot P_{ave} \cdot L}{V \cdot h \cdot f} \quad (16-3)$$

در این معادله، $R(N)$ نرخ بازترکیب بوده که دو نمونه تعریف برای این پارامتر موجود می باشد. ابتدا در برداشتی ساده، با ثابت فرض نمودن طول عمر حاملها، نرخ بازترکیب را به صورت زیر تعریف می نمایند [۳ و ۷]:

$$R(N) = \frac{N}{\tau_c}$$

که طول عمر حاملها به صورت زیر محاسبه می گردد (همان تعریف استاتیک) [۱، ۳ و ۲۵]:

$$\tau_c = \frac{q \cdot V \cdot N_t}{I}$$

اما همانطور که در ابتدای بحث هم بیان شد، نمی توان طول عمر حاملها را ثابت فرض نمود، لذا می بایست از معادله دقیق زیر استفاده نمائیم [۵ و ۸]:

$$R(N) = A_{nr} \cdot N + B_{rad} \cdot N^2 + C_{aug} \cdot N^3 \quad (17-3)$$

در این معادله، A_{nr} ضریب بازترکیب غیرتشعشی ناشی از وجود تله ها و نواقص در شبکه نیمه هادی، B_{rad} ضریب بازترکیب تشعشی دو مولکولی (مهمترین پارامتر ضریب باز ترکیب) و C_{aug} ضریب

1 - Net Gain Coefficient
2 - Internal Waveguide Scattering Losses

باز ترکیب اوژه ناشی از باز ترکیب اوژه در باند هدایت و باند ظرفیت نیمه هادی می باشند. لذا با توجه به این تعریف، طول عمر حاملها به صورت زیر محاسبه می گردد:

$$\tau_c = \frac{N}{R(N)} = \frac{1}{A_{nr} + B_{rad}N + C_{aug}N^2} \quad (18-3)$$

همانطور که مشاهده می نمائیم، طول عمر حاملها به شدت وابسته به نرخ چگالی حاملها درون ناحیه فعال و ساختار تقویت کننده (ضرایب باز ترکیب) می باشد. لذا ثابت فرض نمودن این پارامتر، دور از واقعیت بوده و با نتایج تجربی همخوانی نخواهد داشت. پارامتر مهم دیگری که می بایست به چگالی حامل وابسته باشد، ضریب انتشار خودبخودی است که به صورت زیر تعریف می گردد [۳ و ۸]:

$$N_{sp} = \frac{N}{(N - N_t)} \quad (19-3)$$

همانطور که قبلاً هم در معادلات مشاهده نمودیم، این پارامتر مهمترین کمیت در انتشار نویز می باشد و ثابت انگاشتن این پارامتر نیز صحیح به نظر نمی رسد. چرا که نشان دهنده نرخ واورنگی جمعیت بوده که این نرخ به نوبه خود، نشان دهنده میزان تقویت سیگنال و نویز خواهد بود. لذا در شبیه سازی ها این دو پارامتر با استفاده از روابط (۱۸-۳ و ۱۹-۳) محاسبه گردیده اند. در نهایت، جهت تحلیل انتشار نویز می توان از روابط (۶-۳ تا ۱۰-۳) و با بکارگیری پارامترهای استخراج شده از تحلیل فوق، استفاده نمود.

۳-۴ مدل تقویت کننده نوری نیمه هادی

تقویت کننده مد نظر ما، تقویت کننده نوری نیمه هادی موج رونده ای^۱ (TW-SOA) از جنس گالیم ایندیم آرسناید فسفات (GaInAsP) می باشد که بازتابش سطوح انعکاسی آن اندک و قابل صرف نظر باشد (کمتر از 10^{-4}). همانطور که بیان شد این تقویت کننده، بر مبنای یک تقویت کننده تجربی به صورت ساده مدل سازی شده است که در پژوهشی که توسط [۱۲] انجام شده، پارامترهای ساختاری آن به صورت تجربی استخراج شده و بازیابی بهره آن توسط پژوهشگران مورد ارزیابی و تحلیل قرار گرفته است. لذا جهت اعتبار بخشیدن به مدل ارائه شده، این تقویت کننده را به عنوان مبنای کار قرار داده و مدل سازی و شبیه سازی را بر اساس پارامترهای استخراج شده از آن انجام داده ایم. با توجه به بررسی پژوهشهای پیشین تا کنون هیچگونه تحلیلی به صورتی که در این رساله آمده، بر روی این تقویت کننده ها انجام نشده است.

در راستای شبیه سازی رفتار تقویت کننده، از روش تفاضل محدود یاری جسته، معادلات را حل نموده و مدل ساده ای را در حالت استاتیک (مستقل از زمان) ارائه کرده ایم. لذا در ابتدا می بایست پس از مقدار دهی اولیه به پارامترهای معلوم، معادله نرخ حاملها درون ناحیه فعال (معادله ۱۶-۳) را حل نمود،

1 - Travelling Wave Semiconductor Optical Amplifier (TW-SOA)

سپس تک تک پارامترها نظیر بهره و نویز را با توجه به چگالی حامل بدست آمده، محاسبه کرده و رفتار تقویت کننده را ارزیابی کنیم. مدل ارائه شده، در حقیقت همین مرحله شبیه سازی روابط مربوط به نرخ چگالی حامل، بهره تقویت کننده و نویز آن خواهد بود. لازم به ذکر است که پس از حل اولیه معادلات، تغییرات بسیاری را در شبیه سازی انجام داده تا به نتایج مطلوبی دست یابیم. در نهایت، به مقادیر بهینه‌ای برای پارامترهای ساختاری تقویت کننده دست یافته که در زیر بیان شده است.

طول بهینه تقویت کننده: ۶۵۰ میکرومتر، پهنای لایه فعال: ۳ میکرومتر، ضخامت بهینه لایه فعال: ۰/۲ میکرومتر و ضریب تحدید نوری برابر با ۰/۳ محاسبه شده است. چگالی حامل در گذار برای تقویت کننده نوری نیمه هادی برابر با 10^{18} cm^{-3} و بهره تفاضلی به اندازه 10^{16} cm^2 و $2/5$ اندازه گیری شده است و جریان بایاس بهینه به اندازه ۴۰۰ میلی آمپر بدست می‌آید. پهنای باند نوری تقویت کننده نوری نیمه هادی ۴۰ نانومتر، پهنای باند الکتریکی ۵/۵ گیگاهرتز، ضرایب بازترکیب غیر تشعشعی، تشعشعی و اوژه به ترتیب، $5 \times 10^{-10} \text{ cm}^3/\text{s}$ ، $5 \times 10^{-8} \text{ s}^{-1}$ ، $1 \times 10^{-28} \text{ cm}^6/\text{s}$ و تلفات داخلی تقویت کننده (ناشی از افت ماده) 30 cm^{-1} و در نهایت تلفات تزویج ورودی و خروجی تقویت کننده نوری نیمه هادی ۳ دسی بل در نظر گرفته می‌شود که همگی در جدول (۲-۳) لیست شده‌اند.

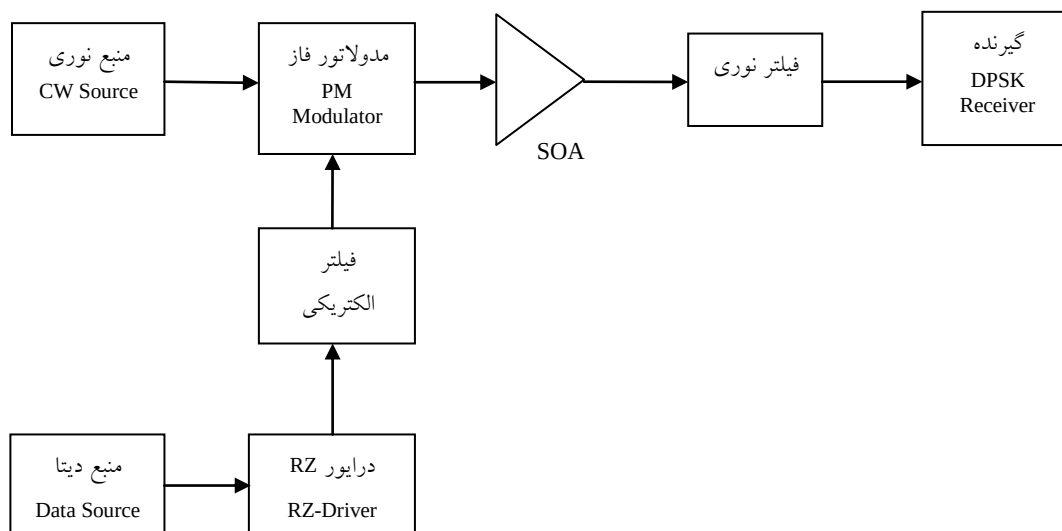
جدول ۳ - ۲: پارامترهای مورد استفاده در شبیه سازی تقویت کننده نوری نیمه هادی

نماد	پارامتر	مقدار و واحد
I	جریان بایاس بهینه تقویت کننده	۴۰۰ میلی آمپر
L	طول بهینه تقویت کننده	۶۵۰ میکرومتر
w	پهنای لایه فعال	۳ میکرومتر
d	ضخامت بهینه لایه فعال	۰/۲ میکرومتر
Γ	ضریب تحدید نوری بهینه	۰/۳
N_t	چگالی حامل در گذار	10^{18} cm^{-3}
α_g	بهره تفاضلی	$2/5 \times 10^{16} \text{ cm}^2$
B_o	پهنای باند نوری	۴۰ نانومتر
B_e	پهنای باند الکتریکی	۵/۵ گیگاهرتز
α_p	تلفات ماده	30 cm^{-1}
α_{int}	تلفات تزویج ورودی و خروجی	۳ دسی بل
A_{nr}	ضریب بازترکیب غیر تشعشعی ناشی از تله ها	$5 \times 10^{-8} \text{ s}^{-1}$
B_{rad}	ضریب بازترکیب تشعشعی	$5 \times 10^{-10} \text{ cm}^3/\text{s}$
C_{aug}	ضریب بازترکیب اوژه	$1 \times 10^{-28} \text{ cm}^6/\text{s}$

پارامترهایی که مستقیماً از نتایج تجربی استخراج شده‌اند عبارتند از: عرض لایه فعال (w)، چگالی حامل در گذار (N_t)، بهره تفاضلی (α_g)، تلفات ماده (α_p) و ضرایب بازترکیب غیر تشعشعی، تشعشعی و اوزه [۱۲]. لذا بر روی این پارامترها هیچ تغییری نمی‌توان ایجاد نمود و فقط بر روی پارامترهایی نظیر جریان بایاس تقویت کننده (I)، طول تقویت کننده (L)، ضخامت لایه فعال (d) و ... می‌توان تغییرات را انجام داد و تقویت کننده را بهینه نمود. البته پارامترهای دیگری نظیر تلفات تزویج ورودی و خروجی تقویت کننده (α_{int})، پهنای باند نوری (B_o) و الکتریکی (B_e) را نیز از [۳ و ۲۵] استخراج نموده‌ایم، چون این پارامترها تقریباً برای تمامی تقویت کننده‌های نوری نیمه هادی موج رونده یکسان می‌باشند. بنابراین شیوه کار به این صورت است که ابتدا با حل معادله نرخ، چگالی حامل را در ناحیه فعال محاسبه نموده، سپس با چگالی حامل بدست آمده و با بکارگیری فرمولهای (۳-۱۱ تا ۳-۱۳)، به ترتیب بهره ماده، بهره خالص و بهره تقویت کننده را محاسبه کرده، سپس با قرار دادن مقدار بهره بدست آمده در رابطه (۳-۶) و محاسبه ضریب گسیل خودبخودی از رابطه (۳-۱۹) توان نویز را نیز بدست آورده و نتایج را مرحله به مرحله نشان خواهیم داد. تمامی نتایج به تفسیر در فصل چهارم ارائه خواهد شد.

۳-۵ ارزیابی پاسخ مدل تقویت کننده نوری نیمه هادی ارائه شده

در راستای بررسی رفتار مدل ارائه شده در سیستم DWDM، شبیه سازی بر روی تقویت کننده نوری نیمه هادی درون خطی با استفاده از مدل نشان داده شده در شکل (۳-۲) صورت گرفته تا بتوان به پارامترهای بهینه شده دست یافت. با توجه به شکل زیر، مدل شبیه سازی شده را به جای تقویت کننده نوری نیمه هادی (SOA) به عنوان تقویت کننده درون خطی گذاشته و در نهایت، سیستم را مورد شبیه سازی، ارزیابی و تحلیل قرار داده‌ایم.



شکل ۳ - ۲: سیستم مورد استفاده برای ارزیابی پاسخ تقویت کننده نوری نیمه هادی

البته شایان ذکر است که برای اثبات صحت عملکرد مدل ارائه شده، آن را برای نمونه با کمیتهای ثابت ارائه شده در [۲۵] نیز تست نموده و به نتایج مشابه با نتایج ارائه شده توسط آن مقاله نیز دست یافته ایم که در فصل چهارم به تفصیل بیان می‌گردد. در شکل (۳-۲) فرمت مدولاسیون سیگنال ورودی به صورت قطع و وصل تفاضلی شیفت فاز^۱ (DPSK) می‌باشد که این سیگنال بوسیلهٔ انکد کردن پرتو خروجی منبع نوری لورنتزی موج پیوسته^۲، شکل گرفته است (در این شبیه سازی، توان ورودی به صورت متغیر در نظر گرفته شده است).

اطلاعات حاصله که به شکل سیگنالهای DPSK با فرمت بازگشت به صفر^۳ (RZ) و به صورت یک توالی باینری شبه تصادفی^۴ (PRBS) با طول کلمه^۵ $(2^8 - 1)$ در نرخ بیت ۱۰ گیگابیت بر ثانیه می‌باشد، به درون یک مدولاتور نوری فاز ارسال می‌گردد. پهنای خط نصف حداکثر موج کامل^۵ (FWHM) منبع نوری موج پیوسته برابر ۱ مگاهرتز بوده و پهنای باند ۳ دسی بلی فیلتر پائین گذر بسل برای تولید منبع دیتا با فرمت بازگشت به صفر، روی ۱۰ گیگاهرتز تنظیم شده است. سیگنال DPSK پس از عبور از این فیلتر، به درون تقویت کننده نوری نیمه هادی ارسال می‌گردد. در خروجی تقویت کننده از یک فیلتر نوری بسل با پهنای باند ۵۰ گیگاهرتز استفاده شده است تا سیگنال خروجی را بهبود بخشیده و در نهایت سیگنال خروجی فیلتر به گیرنده DPSK ارسال می‌گردد تا سیگنال دریافتی را آشکار نماید. شبیه سازی‌ها توسط نرم افزار مطلب (MATLAB) با بکارگیری مدل شبیه سازی شده تقویت کننده در طول موج مرکزی ۱۵۵۰ نانومتر انجام شده است.

۳-۶ بکارگیری مدل تقویت کننده نوری نیمه هادی در سیستم مخابرات نوری DWDM

پس از تحلیل و آنالیز رفتار تقویت کننده در برخورد با سیگنال نوری، می‌بایست عملکرد آن را در سیستم انتقال DWDM مورد ارزیابی قرار دهیم. لذا در ابتدا می‌بایست طرحی را برای انتقال سیگنال در نظر بگیریم. بدین منظور، ما مبنای کار را بر انتقال ۱۰ کانال با نرخ بیت ۱۰ گیگابیت بر ثانیه در نظر گرفته و نتایج را مورد ارزیابی و تحلیل قرار داده‌ایم. سیستم مورد استفاده برای انتقال سیگنال به فواصل دوربرد در شکل (۳-۳) نشان داده شده است.

همانطور که در شکل نشان داده شده است، از ۱۰ منبع لیزری موج پیوسته لورنتزی با توان ورودی -۲۰ dBm در محدوده طول موجی ۱۵۴۹/۵۲ نانومتر تا ۱۵۵۰/۹۷ نانومتر به عنوان منابع سیگنال نوری استفاده نموده‌ایم (فاصله کانالی ۲۰ گیگاهرتز). خروجی این منابع توسط مدولاتورهای فاز ماخ-زندر از جنس

1 - Differential Phase Shift Keying (DPSK)

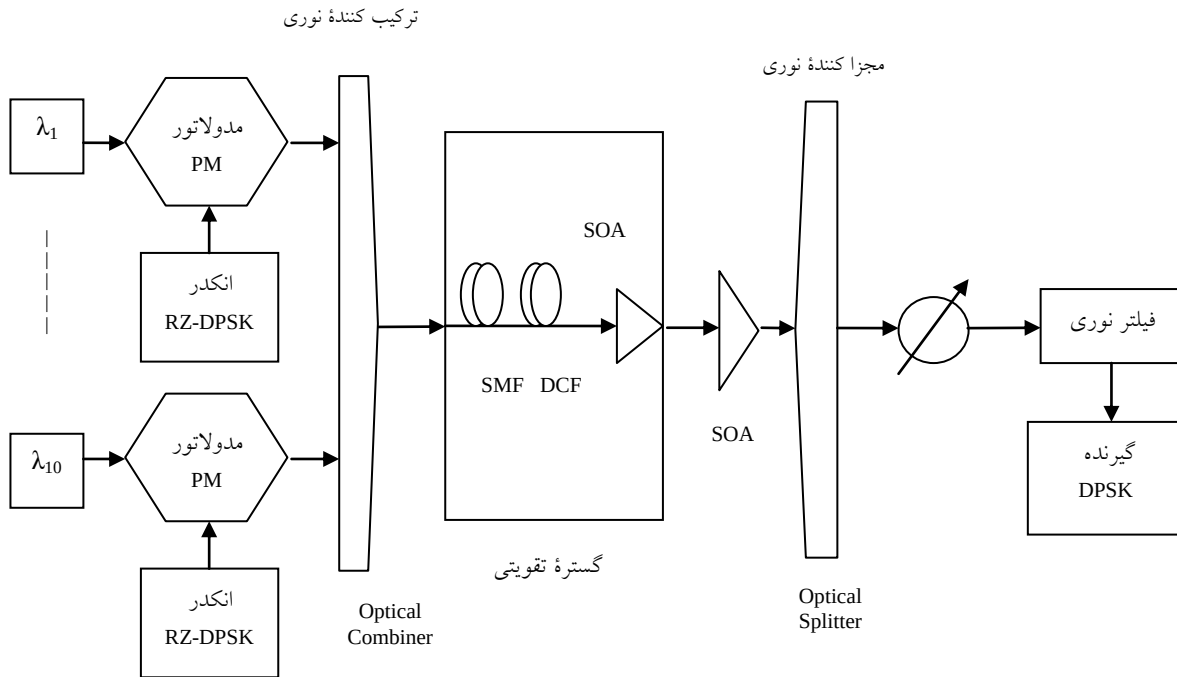
2 - Continuous Wave Lorentzian Light Source

3 - Return to Zero Differential Phase Shift Keying (RZ-DPSK)

4 - Pseudo-Random Binary Sequence (PRBS)

5 - Full Wave Half Maxima (FWHM) Line-Width

لیتیوم نیوبیت (LiNbO_3)، با فرمت بازگشت به صفر (RZ) مدوله شده و پس از ترکیب توسط مالتی پلکسر به داخل فیبر ارسال می‌گردند. جهت تقویت سیگنال در طول مسیر انتقال، به طور متناوب، از گسترده‌های ۷۳/۵ کیلومتری تقویتی شامل، ۶۳ کیلومتر فیبر تک مد، ۱۰/۵ کیلومتر فیبر جبران کننده پاشندگی و یک تقویت کننده‌های نوری نیمه هادی در انتهای گستره استفاده شده است.



شکل ۳-۳: مدل ارائه شده برای بکارگیری تقویت کننده‌های نوری نیمه هادی در سیستم انتقال DWDM

لذا یکی از مسائل اساسی ارزیابی عملکرد سیستم، نحوه چیدمان همین گسترده‌هاست که با توجه به توان مورد نیاز و ضریب تقویت در تقویت کننده‌های نوری نیمه هادی، می‌توان تعداد آنها را تغییر داد. که این مبحث در فصل بعدی همراه با ارائه نتایج مورد بررسی قرار خواهد گرفت. در نتیجه با توجه به مباحث بیان شده، این سیستم، یک سیستم مخابراتی DWDM با فرمت مدولاسیون RZ-DPSK با فاصله کانالی ۲۰ گیگاهرتز می‌باشد که در نرخ بیت ۱۰۰ گیگابیت بر ثانیه، عمل می‌نماید. نتایج حاصل از شبیه سازی این سیستم نیز در فصل چهارم ارائه شده است. در تحلیل و ارزیابی نتایج، شکل شماره (۲-۳) به عنوان مبنای ارزیابی پاسخ تقویت کننده و شکل (۳-۳) مبنای ارزیابی پاسخ سیستم DWDM خواهد بود. با استفاده از این ساختار پایه می‌توان، سیستمهایی با تعداد کانالهای بیشتر و یا نرخ بیت بالاتر را مورد ارزیابی و سنجش قرار داد.

۷-۳ چشم انداز پژوهش

همانطور که بیان شد، با افزایش نرخ انتقال که نیاز مبرم در حوزه مخابرات نوری است، بازتولید الکترونیکی روز به روز پر هزینه تر می گردد. لذا تقویت کننده های نوری پا به عرصه وجود گذارده اند که ضرورت تبدیل پرهزینه سیگنال های نوری به الکتریکی و بالعکس را از بین می برند. هنگامی که تقویت کننده نوری نیمه هادی در ناحیه اشباع عمل می نماید، خواص غیرخطی شدیدی از خود نشان می دهد. لذا این امر، مانع بکارگیری این تقویت کننده ها در حالت اشباع در سیستم های انتقال نوری مالتی پلکس با تقسیم طول موج (WDM) دوربرد می گردد. همانطور که در پیشینه طرح هم بیان شد، اکثر پژوهش های انجام شده در این زمینه، بر روی بکارگیری تقویت کننده های نوری نیمه هادی مرسوم در انتقال دوربرد، متمرکز شده است. در این پایان نامه هم قصد داریم که پژوهشی که توسط [۱۸، ۲۵ و ۲۹] انجام شده را برای بهینه سازی بیشتر تقویت کننده های نوری نیمه هادی برای بهبود توان ارسالی، کاهش نویز و بهینه سازی عملکرد سیستم، در نرخ بیت ۱۰ گیگابیت بر ثانیه، گسترش دهیم که نتایج حاصل از بهینه سازی در فصل چهارم نشان داده شده است.

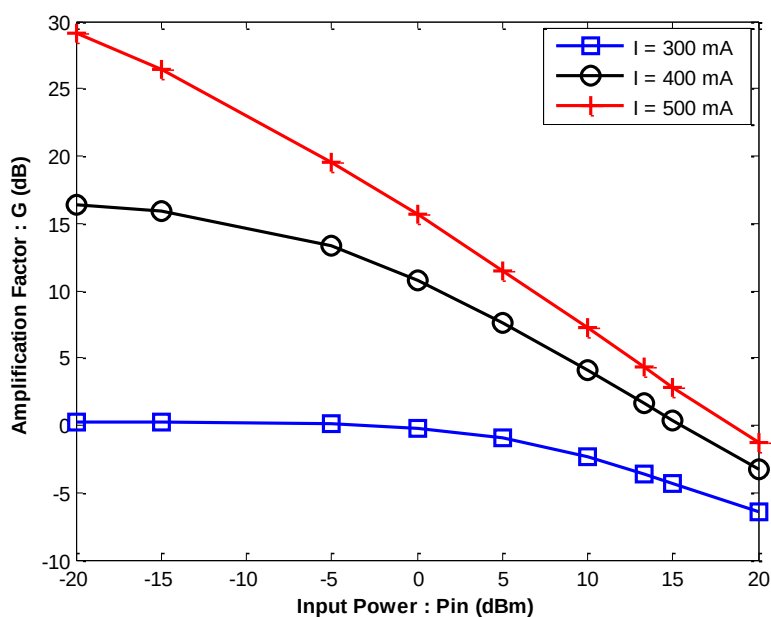
فصل چهارم: تجزیه و تحلیل و بیان نتایج حاصل از شبیه سازی تقویت کننده و سیستم مخابراتی

۴-۱ مقدمه

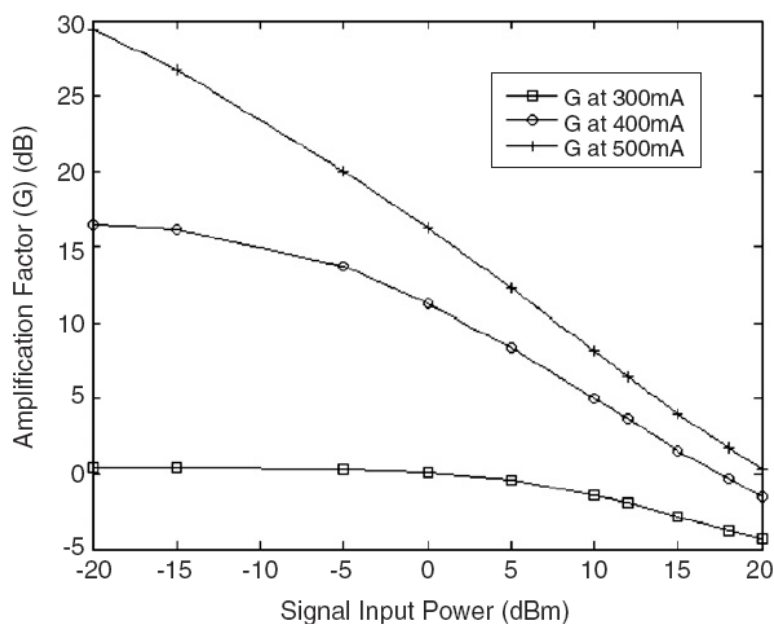
در این فصل قصد بر آن است که مطالب و مباحثی را که در فصل سوم به صورت تئوری بیان نموده ایم، با ارائه شبیه سازی، مدل سازی و بکارگیری تقویت کننده های نوری نیمه هادی متوالی بهینه شده در انتقال ۱۰ کانال DWDM با نرخ بیت ۱۰ گیگابیت بر ثانیه با فاصله کانالی ۲۰ گیگاهرتز، تکمیل نموده و نتایج را مورد ارزیابی و سنجش قرار دهیم. لذا ابتدا به تحلیل نتایج حاصل از مدل سازی تقویت کننده پرداخته و پارامترهایی نظیر ضریب تقویت، توان نویز انتشاری خودبخودی و تداخل کانالی (کراس تاک) را شبیه سازی نموده و در چند مورد با نتایج پژوهشهای پیشین مقایسه می کنیم سپس اندکی به بحث و بررسی پیرامون بکارگیری تقویت کننده های نوری نیمه هادی در سیستم انتقال خواهیم نشست که این کار را ابتدا با تحلیل نتایج حاصل از بکارگیری تقویت کننده در یک فاصله تقویتی اندک آغاز نموده و سپس فاصله انتقال را گسترش داده و سیستم را مورد ارزیابی و تحلیل قرار خواهیم داد.

۴-۲ ارزیابی اعتبار مدل ارائه شده برای تقویت کننده نوری نیمه هادی

در ابتدا ذکر این نکته ضروری است که برای اثبات صحت مدل خود، همانطور که در فصل سوم نیز بیان شد، بهره تقویت کننده که مهمترین و کلیدی ترین مشخصه هر تقویت کننده می باشد را با بکارگیری پارامترهای ارائه شده در [۲۵] نیز محاسبه کرده که در ادامه بیان خواهد شد. به منظور شبیه سازی تقویت کننده با پارامترهای ثابت ارائه شده در [۲۵]، که نخستین هدف پژوهنده بوده است، همانگونه که در فصل سوم هم بیان گردید، با استفاده از روش تفاضل محدود برای شبیه سازی تقویت کننده و بکارگیری شکل (۲-۳) برای شبیه سازی پاسخ تقویت کننده در تقویت سیگنال نوری، ابتدا رابطه کلیدی نرخ چگالی حامل (رابطه ۳-۱۶) را با استفاده از پارامترهای زیر که مستقیماً از پژوهش فوق الذکر استخراج گردیده است، محاسبه نموده و سپس با بدست آوردن سایر روابط مرتبط بیان شده در بخش (۳-۳-۲) ضریب تقویت (G) برای سه جریان بایاس، محاسبه گردیده است. پارامترهای مورد استفاده در پژوهش [۲۵] عبارتند از: طول تقویت کننده: ۷۵۰ میکرومتر، پهنای لایه فعال: ۲ میکرومتر، ضخامت لایه فعال: ۰/۲ میکرومتر، ضریب تحدید نوری: ۰/۴، چگالی حامل در گذار: $10^{24} \times 1/5$ ، بهره تفاضلی: $10^{-20} \times 2$ ، تلفات داخلی تقویت کننده: 10^{-1} و در نهایت جریان بایاس تقویت کننده برابر با ۴۰۰ میلی آمپر در نظر گرفته شده که نتیجه شبیه سازی حاصل از این روش در شکل (۴-۱-الف) ترسیم گردیده است. در شکل (۴-۱-ب) نیز منحنی تغییرات ضریب تقویت به ازای توان ورودی در سه جریان بایاس که مستقیماً از پژوهش [۲۵] استخراج گردیده، رسم شده است.



(الف)



(ب)

شکل ۴ - ۱: منحنی ضریب تقویت به ازای توان ورودی برای پارامترهای ارائه شده در پژوهش سینگ و کالر [۲۵]

الف) شبیه سازی به وسیله مدل ارائه شده در این پایان نامه و ب) استخراج مستقیم از مقاله فوق

همانگونه که مشاهده می شود، مدل ارائه شده در این پایان نامه، تطابق خوبی با نتایج پژوهش [۲۵] دارد که این امر گواه ادعای پژوهنده در اثبات اعتبار مدل می باشد. برای بررسی بیشتر، پژوهنده اکثر منحنی های موجود را در ابتدا بازتولید نموده است و همانگونه که انتظار می رفت، نتایج بسیار مشابهی بدست آمده است. به منظور جلوگیری از پراکندگی موضوع فقط به ارائه منحنی بهره بسنده کرده و خواننده می تواند

برای بررسی بیشتر به [۱۲، ۱۸ و ۲۵] مراجعه نماید. مانگونه که در بخش‌های بعد هم بیان خواهد شد، نتایج پژوهشهای پیشین بخصوص پژوهش فوق‌الذکر، به نظر پژوهنده دور از واقعیت بوده و با در نظر گرفتن مقادیر صحیح کمیتها می‌توان به مقادیر واقعی تری دست یافت. لذا در این بخش، منحنی‌های مربوطه فقط به صورت مقایسه‌ای رسم شده‌اند و هیچگونه تحلیلی صورت پذیرفته است. چرا که خود منحنی‌ها گویای همه چیز خواهند بود و در بخشهای بعدی به طور مفصل به بررسی هر یک از مشخصه‌های تقویت کننده خواهیم پرداخت. اندک تفاوت مشاهده شده بین منحنی‌ها به خصوص در انتهای منحنی را می‌توان به خطای محاسباتی و یا روش شبیه سازی متفاوتی که برای مشخصه‌های تقویت کننده انتخاب شده است مرتبط دانست.

۴-۳ تحلیل و ارزیابی نتایج حاصل از شبیه سازی رفتار تقویت کننده

در راستای شبیه سازی پاسخ تقویت کننده و مشخصه‌های کلیدی آن، همانطور که در فصل سوم نیز بیان گردید، ابتدا با نوشتن برنامه‌ای با بکارگیری روش تفاضل محدود، چگالی حامل را محاسبه کرده و سپس پارامترهای دیگر نظیر ضریب تقویت و نویز را بدست آورده و پاسخ تقویت کننده را ارزیابی می‌کنیم. لذا تقویت کننده را مورد ارزیابی قرار داده و نتایج بدست آمده را تجزیه و تحلیل می‌نمائیم. اما از این قسمت به بعد، تمامی شبیه سازی‌ها مبتنی بر پارامترهای ارائه شده در جدول (۳-۲) صورت پذیرفته است.

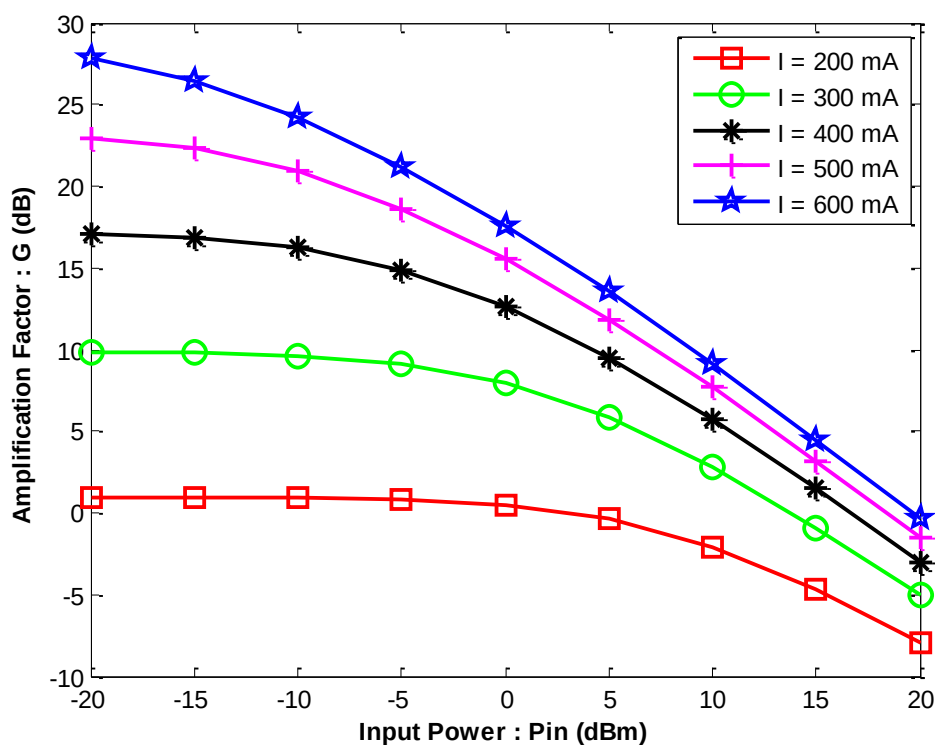
شایان ذکر است که قبل از اینکه پارامتری انتخاب و سپس بهینه گردد، برای گزینش خود پارامتر برای مثال جریان بهینه یا طول بهینه، اکثراً نیازمند آن هستیم که تعداد دو یا سه پارامتر یا بیشتر را به طور همزمان تغییر داده و سپس با در نظر گرفتن میزان ضریب تقویت مطلوب و توان نویز انتشاری اندک، به مقدار بهینه برای یکی رسید و دیگر پارامترها را با ثابت فرض نمودن آن پارامتر محاسبه نمود. البته برای گزینش اولیه پارامترهای قابل تغییر، نظیر طول تقویت کننده، جریان بایاس، ضریب تحدید نوری و ضخامت لایه فعال با توجه به بررسی و مطالعه پژوهشهای پیشین، مقادیری را برمی‌گزینیم که به این پژوهشها نزدیک بوده و سپس به بهینه سازی آنها بر اساس میزان ضریب تقویت مطلوب و میزان انتشار نویز کمتر، می‌پردازیم.

برای مثال برای گزینش ضریب تقویت مطلوب، میزانی انتخاب شده است که از ضریب تقویتی که تا کنون در پژوهشهای پیشین که پژوهنده بررسی نموده است، بیشتر باشد و سعی شده که تا حد امکان توان نویز انتشاری هم کاهش یابد. با این وجود در این قسمت به علت حجم زیاد مطالب و برای جلوگیری از پراکندگی موضوع، از نشان دادن اینگونه بهینه سازی صرفنظر شده و با فرض اینکه این بهینه سازی صورت پذیرفته است، تغییرات را در پارامترهای مورد بحث انجام داده تا تاثیر آنها را بر روی ضریب تقویت و توان نویز انتشاری خودبخودی و در بعضی موارد دیگر مشخصه‌ها مشاهده نموده و به بهینه سازی آنها بپردازیم.

در این بخش، تاثیر تغییر پارامترهای مختلف را بر مشخصه‌های بهره و نویز تقویت کننده مورد ارزیابی قرار خواهیم داد. در بخش اول، تاثیر تغییرات جریان بایاس تقویت کننده و در بخش دوم، تاثیر تغییرات ضریب تحدید نوری را مورد کاوش قرار داده شده است. در بخش سوم، تاثیرات تغییر طول تقویت کننده، در بخش چهارم، تاثیر تغییرات ضخامت لایه فعال و در بخش پنجم تغییرات عرض لایه فعال را مورد بررسی قرار داده و در بخش پنجم، خلاصه‌ای از تاثیر تغییر پارامترهای مختلف به طور فهرست وار بیان خواهد شد.

۴-۳-۱ بهینه سازی بر اساس تغییرات جریان بایاس تقویت کننده

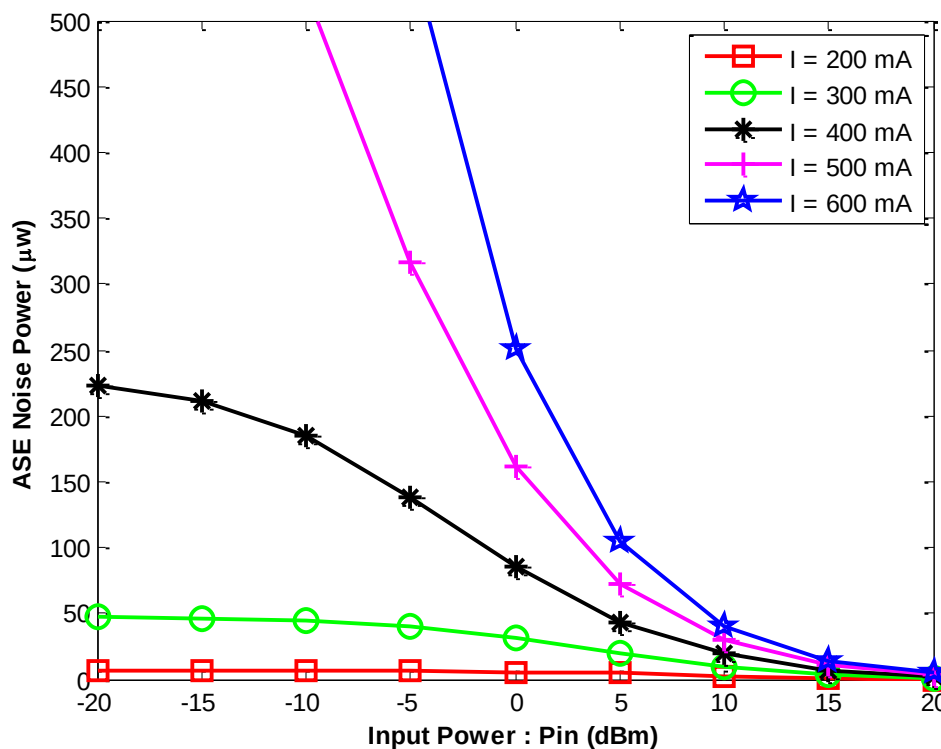
در این بخش، آنالیز را از مهمترین مشخصه تقویت کننده یعنی ضریب تقویت (G) آغاز می‌نمائیم. در شکل (۴-۲) منحنی تغییرات ضریب تقویت به ازای تغییرات توان ورودی از -20 dBm تا 20 dBm (از 10 میکرو تا 100 میلی وات) برای پنج جریان بایاس بین 200 تا 600 میلی آمپر برای مدل شبیه سازی شده تقویت کننده نوری نیمه هادی درون خطی، محاسبه و ترسیم شده است. همانطور که مشاهده می‌نمائیم با افزایش جریان بایاس، ضریب تقویت افزایش یافته ولی در مقابل، با افزایش توان ورودی، ضریب تقویت کاهش می‌یابد که این امر با نتایج تئوری ارائه شده در فصل سوم کاملاً مطابقت دارد.



شکل ۴ - ۲: منحنی تغییرات ضریب تقویت به ازای توان ورودی در پنج جریان بایاس مختلف (مدل ارائه شده توسط این پژوهش)

با بررسی رابطه (۳-۱۶) که بیانگر نرخ تغییرات چگالی حامل است، می‌توان علت این امر را به صورت تئوری درک نمود. طرف راست این رابطه سه مؤلفه دارد که مؤلفه دوم و سوم از مؤلفه نخست کم شده‌اند، لذا با افزایش جریان بایاس (I) در توان ورودی ثابت، همانطور که انتظار می‌رود، نرخ تغییرات افزایش می‌یابد که این امر باعث آن می‌گردد که چگالی حامل نیز افزایش یافته که به تبع آن بهره تقویت کننده نیز افزایش می‌یابد. اما در سویی دیگر، با افزایش توان ورودی (P_{in}) در جریان بایاس ثابت، متوسط توان خروجی (رابطه ۳-۱۵) که موثرترین پارامتر در سومین مؤلفه سمت راست معادله نرخ می‌باشد، افزایش یافته و باعث کاهش نرخ تغییرات شده که این امر سبب آن می‌گردد که چگالی حامل نیز کاهش یابد و به تبع آن بهره نیز کاهش یابد. بنابراین، ترکیبی از افزایش و کاهش جریان بایاس و توان ورودی تقویت کننده، تغییراتی را به صورت منحنی فوق ایجاد می‌نماید.

از طرفی با بررسی منحنی ضریب تقویت این تصور به ذهن می‌رسد که می‌توان با افزایش جریان بایاس، بهره بیشتری دریافت نمود که این امر کاملاً درست است، اما بزرگترین محدودیتی که پیش می‌آید این است که با افزایش جریان بایاس، همانطور که در شکل (۴-۳) مشاهده می‌نمائیم، نویز انتشاری هم به شدت افزایش خواهد یافت. در فصل سوم هم به صورت تئوری به این مطلب اشاره شده بود که با افزایش بهره تقویت کننده، نویز انتشاری نیز به شدت افزایش می‌یابد.



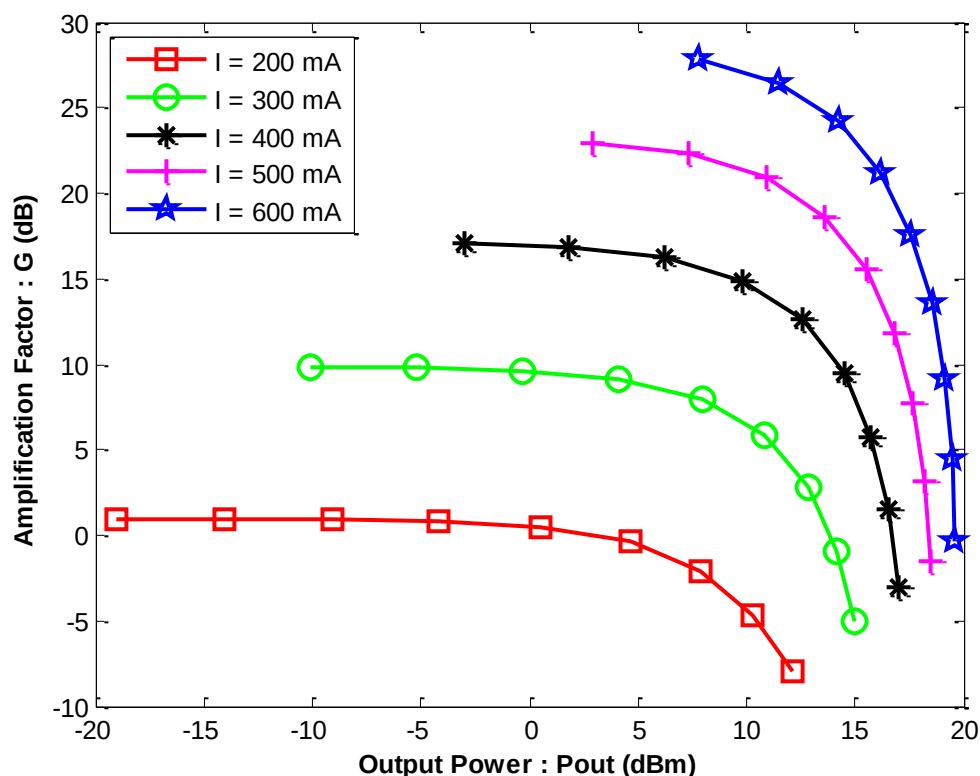
شکل ۴ - ۳: منحنی تغییرات توان نویز انتشاری خودبخودی به ازای تغییرات توان ورودی تقویت کننده

در سویی دیگر، با مقایسه منحنی‌های ضریب تقویت و نویز انتشاری خودبخودی، می‌توان دریافت که با افزایش جریان تزریق، بهره به میزان اندکی افزایش می‌یابد اما توان نویز، افزایش چشمگیری خواهد داشت. لذا نمی‌توان جریان بایاس را تا هر میزان دلخواهی افزایش داد. علت افزایش نویز را می‌توان با بررسی رابطه (۳-۶) دریافت. چرا که افزایش بهره مستقیماً با میزان افزایش نویز انتشاری خودبخودی در ارتباط بوده و از سویی دیگر، ضریب گسیل خودبخودی (رابطه ۳-۱۹) که نشان دهنده میزان وارونگی جمعیت است نیز به شدت وابسته به چگالی حامل می‌باشد. لذا با افزایش جریان بایاس و نتیجتاً افزایش چگالی حامل، علاوه بر اینکه بهره افزایش می‌یابد، ضریب گسیل خودبخودی نیز افزایش یافته که این امر سبب آن می‌گردد که نویز انتشاری خودبخودی (P_{ASE}) با شیب تندتری افزایش یابد. لذا جریانهای بایاس بیش از ۴۰۰ میلی‌آمپر به شدت نویز انتشاری را افزایش می‌دهند.

اما در مقابل، با افزایش توان ورودی، چگالی حامل کاهش یافته و کاهش چگالی حامل، هم باعث کاهش بهره و هم باعث کاهش ضریب گسیل خودبخودی خواهد شد، لذا نویز انتشاری با شیب تندتری نسبت به ضریب تقویت، رو به کاهش می‌گذارد. با بررسی و تحلیل منحنی (۴-۳) در می‌یابیم که در جریانهای بایاس کم، مثلاً ۲۰۰ میلی‌آمپر، میزان توان نویز انتشاری خودبخودی قابل صرفنظر است، اما همانطور که در شکل (۴-۲) مشاهده نمودیم، در این جریان بایاس، ضریب تقویت به شدت اندک است و به سمت منفی شدن میل می‌نماید. لذا نمی‌توان از این جریان، جهت بایاس کردن تقویت کننده استفاده نمود. از طرفی در جریان بایاس ۶۰۰ میلی‌آمپر، ضریب تقویت خوبی مشاهده می‌گردد، اما نویز هم به شدت افزایش می‌یابد، لذا این جریان هم برای بایاس کردن تقویت کننده، مناسب نمی‌باشد. بدین منظور همانطور که در شکل‌های (۴-۲ و ۴-۳) نشان داده شده است جریان بایاس تقویت کننده را برای چندین جریان بایاس بین این دو مقدار تغییر داده که نتایج را مشاهده می‌نمائیم. در جریان بایاس ۳۰۰ میلی‌آمپر، وضعیتی مشابه با جریان ۲۰۰ میلی‌آمپر و در جریان ۵۰۰ میلی‌آمپر وضعیتی مشابه با جریان ۶۰۰ میلی‌آمپر مشاهده می‌گردد، اما در جریان بایاس بهینه ۴۰۰ میلی‌آمپر، نتایج مطلوب و بهتری مشاهده شده است. از این رو برای بکارگیری تقویت کننده از جریان بایاس بهینه ۴۰۰ میلی‌آمپر استفاده می‌نمائیم، چرا که در این جریان، در توان ورودی ۲۰ dBm - ضریب تقویت مطلوب ۱۷/۰۵ دسی بل و توان نویز انتشاری اندکی به میزان ۲۲۳ میکرو وات مشاهده شد که در مقایسه با [۱۸ و ۲۵] هر دو بهبود یافته‌اند.

نکته‌ای که اینک به ذهن پژوهنده می‌رسد این است که در حال حاضر با میزان تقویت دریافت شده از تقویت کننده نوری نیمه هادی در توان ورودی ۱۰ میکرو وات، می‌توان یا توان ورودی تقویت کننده را کاهش داد و یا همانطور که در مبحث بکارگیری تقویت کننده در سیستم مخابراتی بیان خواهد شد، می‌توان فاصله تقویتی را افزایش داد که پژوهنده راه دوم را برگزیده است، که در جای خود به طور مفصل مورد

بحث و بررسی قرار خواهد گرفت. اکنون دوباره به مبحث اصلی باز گشته و به بررسی و تحلیل اثرات تغییر جریان بایاس در تقویت کننده می پردازیم. در شکل (۴-۴) منحنی تغییرات ضریب تقویت را به ازای میزان تغییرات توان خروجی مشاهده می نماییم. این منحنی اطلاعات مفیدی را در خود دارد که مهمترین آنها این است که نشان می دهد که در چه محدوده تغییراتی از توان خروجی، می توان بهره تقریباً یکسانی دریافت نمود. بازهم آنچه مشخص این است که ضریب تقویت برای اکثر جریانهای بایاس تا توان خروجی ۱۰ dBm یا همان ۱۰ میلی وات تقریباً ثابت است.



شکل ۴ - ۴ : منحنی تغییرات ضریب تقویت به ازای تغییرات توان خروجی در جریان های بایاس مختلف

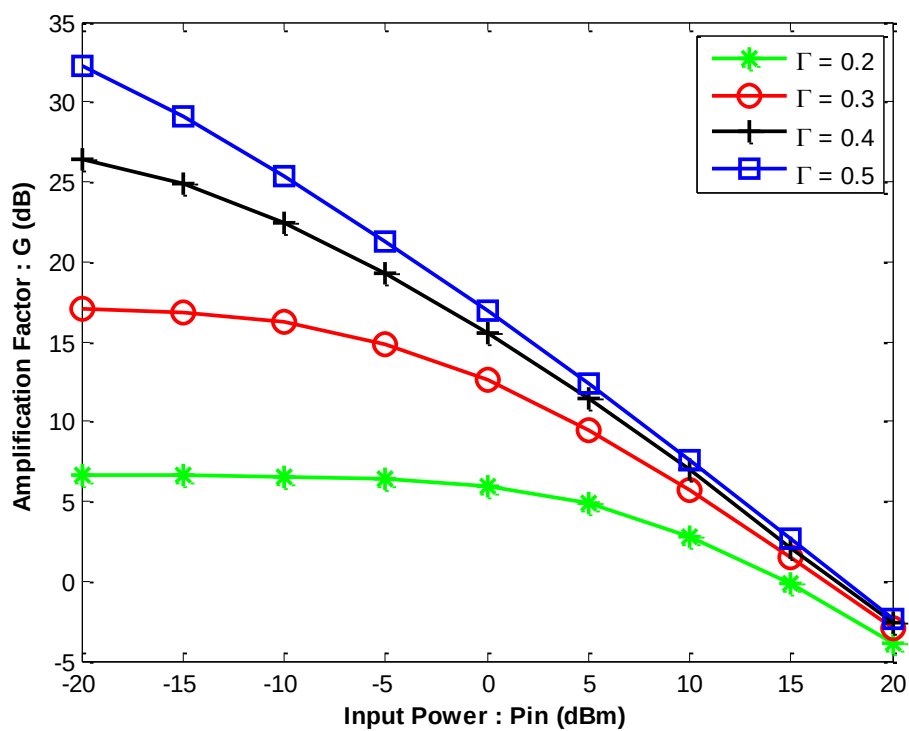
در جریانهای بایاس کم (۲۰۰ میلی آمپر) محدوده ثبات بهره بیشتر بوده اما دامنه آن بسیار کم است. از طرفی دیگر در جریان های بایاس زیاد (۶۰۰ میلی آمپر) محدوده ثبات بهره بسیار کم است، اما دامنه آن بسیار زیاد است. لذا با توجه منحنی (۴-۴) در جریان بایاس ۴۰۰ میلی آمپر ضریب تقویت دارای محدوده ثبات نسبی مطلوب و بیشینه ۱۷/۰۵ دسی بل می باشد. لذا همانطور که گفته شد این جریان را می توان به عنوان جریان بایاس بهینه برای تزریق به تقویت کننده مناسب دانست.

۴-۳-۲ بررسی و تحلیل اثر تغییر ضریب تحدید نوری بر ضریب تقویت و نویز انتشاری تقویت کننده

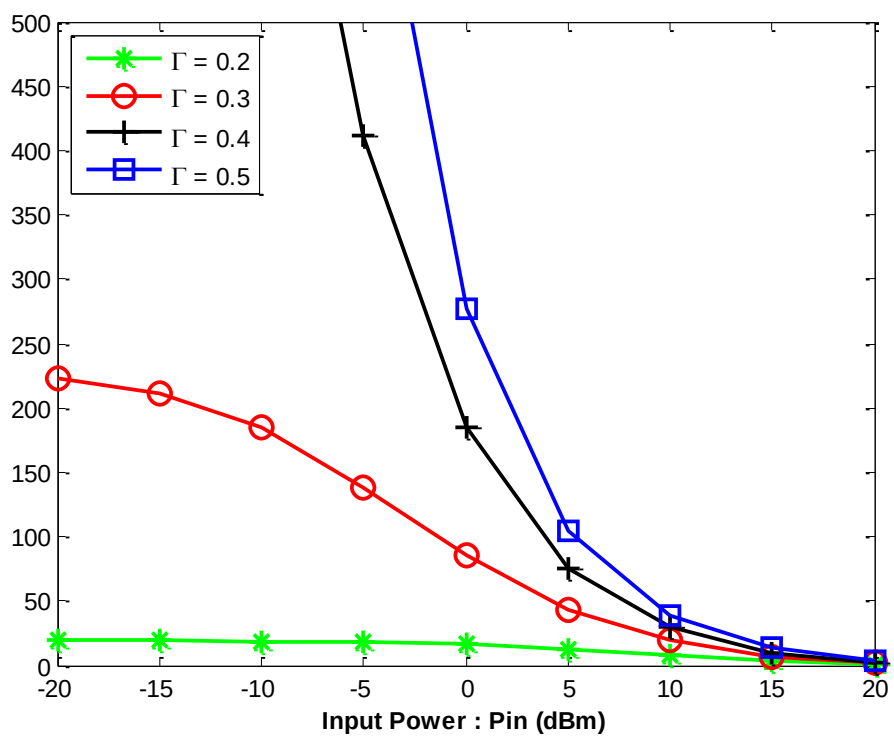
در راستای بهینه سازی پارامترهای ساختاری تقویت کننده نوری نیمه هادی نیازمند آن هستیم که تقویت کننده را برای پارامترهای دیگری به غیر از جریان بایاس نیز مورد ارزیابی قرار داده تا بتوان پاسخ تقویت کننده را بهینه نمود و همچنین به مقادیر مطلوبی برای سایر پارامترها دست یابیم. لذا در این بخش، تقویت کننده را به ازای مقادیر متفاوت ضریب تحدید نوری (I) مورد ارزیابی قرار داده و اثر این تغییرات را بر ضریب تقویت و نویز انتشاری تقویت کننده مشاهده خواهیم نمود. لذا با توجه به مباحثی که در بخش قبل بیان گردید، جریان بایاس تقویت کننده را ۴۰۰ میلی آمپر در نظر گرفته و شبیه سازی های این بخش را انجام خواهیم داد.

همانطور که در فصل دوم به طور اختصار بیان گردید، ضریب تحدید نوری در حقیقت بیانگر نسبت ضخامت لایه فعال (d) به ضخامت موثر لایه فعال (d_{eff}) یا به عبارتی: $\Gamma = \frac{d}{d_{eff}}$ است. منظور از ضخامت موثر، میزان خروج مد قطبش نوری از موج بر می باشد. با توجه با اینکه $d_{eff} > d$ بوده، لذا پارامتر ضریب تحدید نوری همیشه عددی بین ۰ و ۱ خواهد بود ($0 < \Gamma < 1$) و ایده آل این است که به سمت ۱ میل نماید که این پدیده بدان معنی است که میزان بیشتری از مد قطبش درون لایه فعال که در حقیقت نوعی موج بر است، خواهد ماند و عمل انتقال و تقوت نور به صورت ایده آل تر صورت گرفته و ضریب تقویت افزایش خواهد یافت. هر چه که d_{eff} بیشتر باشد لذا Γ کاهش یافته و این امر بدان معنی است که نور باید در محدوده بزرگتری گذار نماید، لذا بهره تقویت کننده کاهش خواهد یافت. البته شایان ذکر است که همانطور که در بخش قبلی هم اشاره شد، نمی توان بهره را تا هر میزان دلخواهی افزایش داد، چرا که نویز هم با شیب تندی افزایش خواهد یافت. بنابراین می بایست، ضریب تحدید نوری را در حد مطلوبی تنظیم نمود که این پارامتر هم به ساختار تقویت کننده وابسته خواهد بود.

در شکل (۴-۵-الف) منحنی تغییرات ضریب تقویت (G) را به ازای تغییرات ضریب تحدید نوری (I) از ۰/۲ تا ۰/۵ مشاهده می نمائیم. همانطور که پیشتر نیز بیان گردید، با افزایش ضریب تحدید نوری و لذا قابل مقایسه شدن d و d_{eff} ، بهره تقویت کننده به شدت افزایش یافته ولی در سمت مقابل همانگونه که در شکل (۴-۵-ب) مشاهده می گردد، نویز انتشاری هم افزایش می یابد. علت اینکه با افزایش ضریب تحدید نوری، ضریب تقویت هم افزایش می یابد این است که هنگامی که محیط گسترده مد قطبش موج نوری کاهش می یابد، توان نوری در محدوده کوچکتري عبور کرده و میزان نفوذ نور به خارج از لبه های موج بر کمتر شده و لذا بدیهی است که ضریب تقویت موج نوری افزایش خواهد یافت. بنابراین به وضوح مشخص است که ضریب تحدید نوری بهینه ۰/۳ مقدار قابل قبولی می باشد.



(الف)



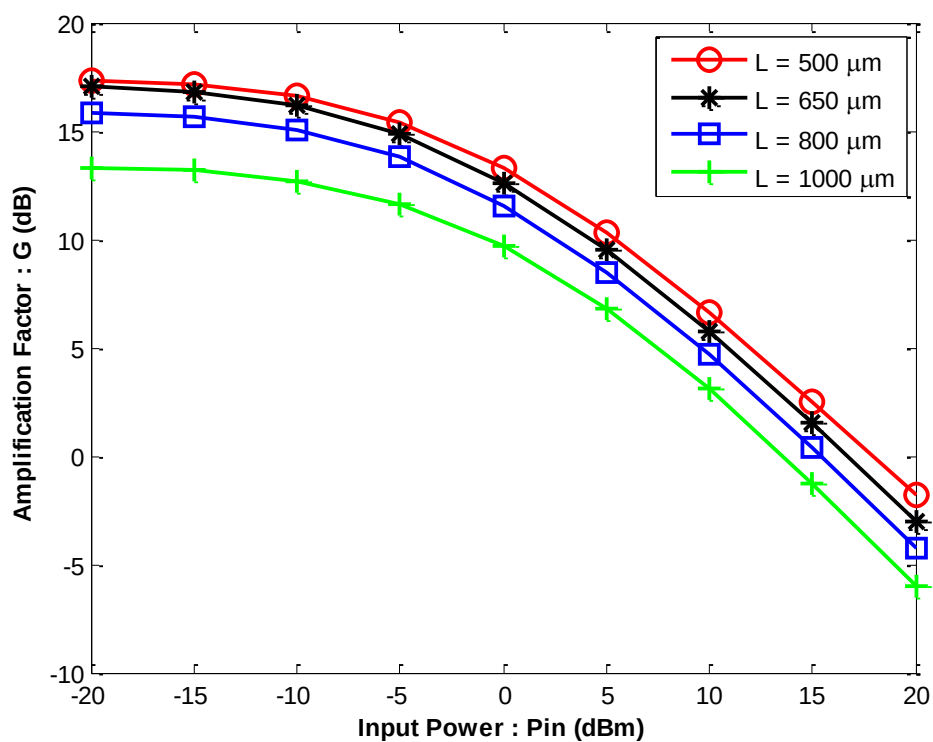
(ب)

شکل ۴ - ۵: منحنی تاثیرات تغییر ضریب تحدید نوری (I)
بر روی الف) ضریب تقویت و ب) توان نویز انتشاری در تقویت کننده

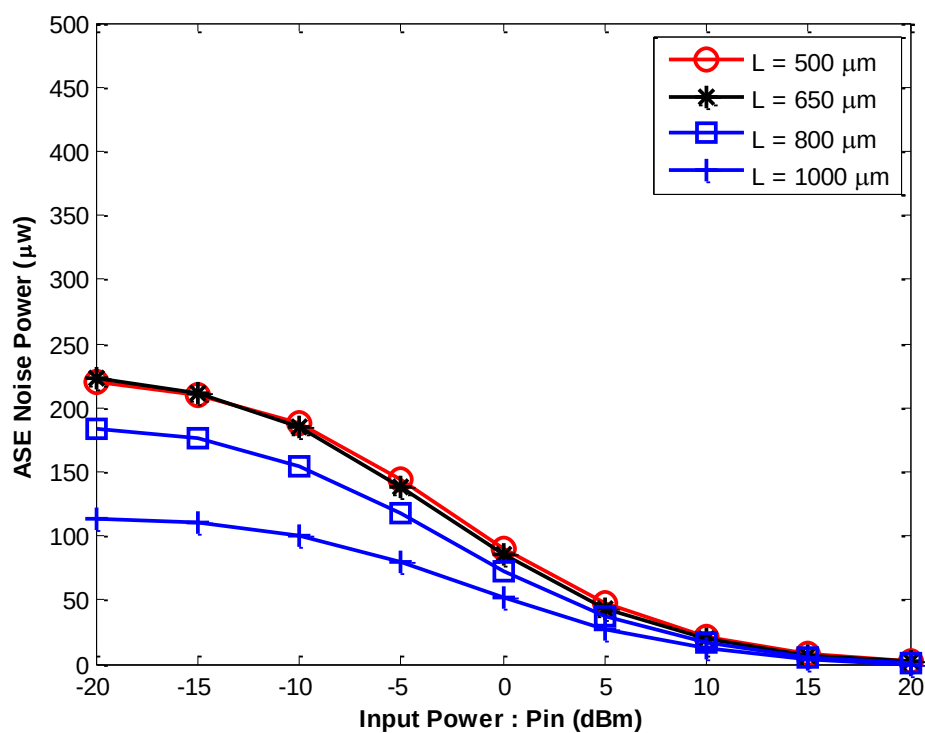
چرا که همانطور که مشاهده می‌گردد در جریان بایاس ۴۰۰ میلی آمپر، مقادیر بیش از ۰/۳ به شدت نویز انتشاری را افزایش داده و مقادیر کمتر از ۰/۳ به شدت بهره را کاهش خواهند داد. در این پژوهش با توجه به اینکه $d = 0.2 \mu m$ و $\Gamma = 0.3$ در نظر گرفته شده است، لذا مقدار $d_{eff} = 0.67 \mu m$ محاسبه خواهد شد که نشان دهنده این است که موج نوری در محیطی به ضخامت ۰/۶۷ میکرومتر، گسترده خواهد شد. از طرفی، شاید این نکته به ذهن خطور کند که با کاهش جریان بایاس بتوان ضریب تحدید را افزایش داده و ضریب تقویت و نویز انتشاری را تنظیم نمود، اما با استناد به پژوهشی که [۱۲ و ۱۵] انجام داده‌اند، برای دسترسی به پاسخ سریعتر می‌بایست، جریان بایاس، طول تقویت کننده و ضریب تحدید نوری را افزایش داد. علیرغم اینکه بررسی سرعت سوئیچینگ تقویت کننده از مطالب مورد بحث این پژوهش نمی‌باشد، ولی بازهم سعی بر آن شده است که پارامترها به گونه‌ای گزینش گردند که تقویت کننده بتواند در سرعت سوئیچینگ بالا فعالیت نماید. لذا جریان بایاس ۴۰۰ میلی آمپر و ضریب تحدید نوری ۰/۳ از نظر پژوهنده، مقادیر قابل قبولی بوده چرا که می‌توان به ضریب تقویت مطلوب، نویز کمتر و با استناد به مطالب بیان شده به سرعت سوئیچینگ مطلوبی دست یافت.

۴-۳-۳ بررسی و تحلیل اثر تغییر طول ناحیه فعال بر ضریب تقویت و نویز انتشاری تقویت کننده

همانگونه که پیشتر هم بیان گردید، با حذف سطوح بازتابی در لیزرهای نیمه هادی، یک موج‌بر نوری درون پیوند P/N دیود لیزری شکل می‌گیرد که وظیفه انتقال و تقویت سیگنال را بر عهده دارد. این موج‌بر دارای سه مؤلفه ساختاری طول، عرض و ارتفاع بوده که تغییر در هریک از این سه مؤلفه باعث تقویت یا تضعیف سیگنال ورودی می‌گردد. به این موج‌بر، لایه فعال یا ناحیه فعال نیز می‌گوئیم، لذا طول موج‌بر که همان طول تقویت کننده بوده به نام طول ناحیه فعال شناخته شده، عرض موج‌بر همان عرض لایه فعال و ارتفاع موج‌بر هم همان ضخامت لایه فعال می‌باشد. با توجه به این که عرض لایه فعال به صورت مستقیم از پژوهش [۱۲] استخراج گردیده است، لذا بر روی این پارامتر هیچگونه بهینه سازی صورت نگرفته است. لذا در این بخش، با تغییر طول محیط فعال (طول تقویت کننده) تاثیر آن را بر روی ضریب تقویت و توان نویز انتشاری تقویت کننده بررسی خواهیم نمود. همانطور که از مبانی هر تقویت کننده نوری می‌دانیم، می‌توان حدس زد که در صورت افزایش طول تقویت کننده، بهره کاهش پیدا می‌کند. در این پژوهش برای بررسی اثرات تغییر طول تقویت کننده، طول محیط فعال را به صورت متغیر در نظر گرفته و ضریب تقویت و توان نویز انتشاری خودبخودی برای چهار مقدار ۵۰۰، ۶۵۰، ۸۰۰ و ۱۰۰۰ میکرومتر در جریان بایاس ۴۰۰ میلی ارزیابی شده اند. در شکل (۴-۶-الف) منحنی تغییرات ضریب تقویت به ازای توان ورودی و در شکل (۴-۶-ب) منحنی تغییرات توان نویز انتشاری خودبخودی به ازای تغییرات توان ورودی برای مقادیر متفاوت طول تقویت کننده به تصویر کشیده شده است.



(الف)



(ب)

شکل ۴ - ۶: منحنی تاثیر تغییر طول تقویت کننده نوری نیمه هادی (L) بر روی

الف) ضریب تقویت و ب) توان نویز انتشاری خودبخودی

با توجه به پاسخ تقویت کننده، به وضوح نمایان است که با افزایش طول ناحیه فعال، ضریب تقویت کاهش یافته و متعاقب آن توان نویز انتشاری نیز کاهش می‌یابد. اما نکته اساسی این است که تغییر این پارامتر، باعث اعمال تغییرات بسیار بزرگی در منحنی‌های ضریب تقویت و توان نویز انتشاری و متعاقباً سایر مشخصات تقویت کننده نخواهد شد. با کاهش این پارامتر می‌توان ضریب تقویت را افزایش داد ولی در مقابل، نویز هم افزایش پیدا می‌کند و همانطور که گفته شد، سرعت سوئیچینگ تقویت کننده کاهش می‌یابد. لذا پژوهنده باز هم، طول بهینه ۶۵۰ میکرومتر را به عنوان طول تقویت کننده برمی‌گزیند.

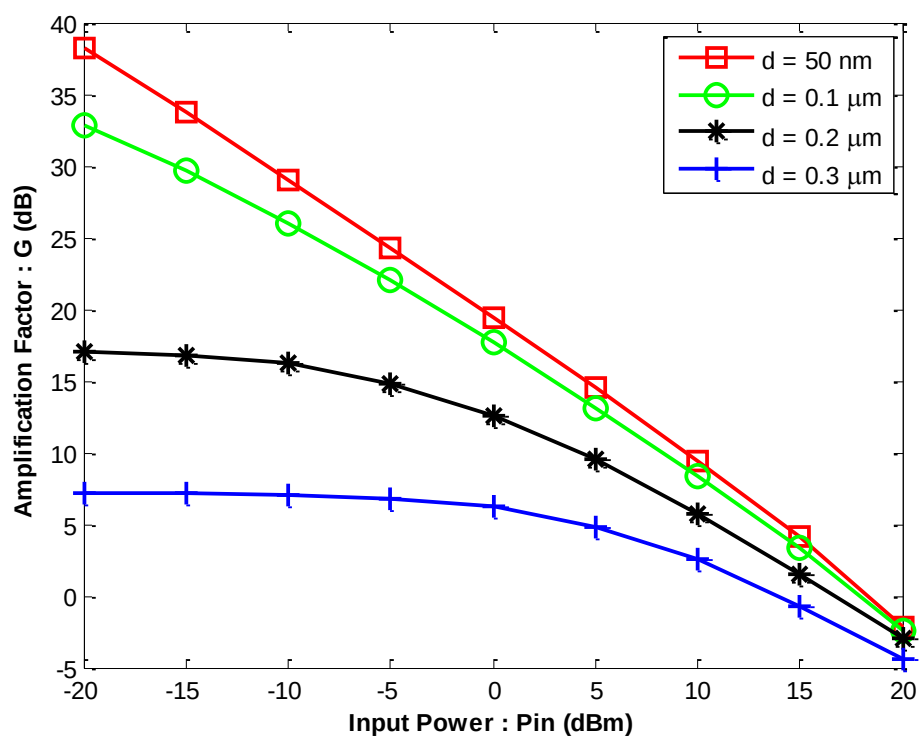
علت اینکه با افزایش طول تقویت کننده، ضریب بهره کاهش می‌یابد، این است که هنگامی که تقویت کننده با یک جریان بایاس DC ثابت راه اندازی می‌شود، این جریان در سطح محیط فعال گسترده شده و باعث اعمال تغییراتی در چگالی حامل درون ناحیه فعال شده و حتی اگر نور هم به داخل تقویت کننده تزریق نگردد، باز هم به علت وجود گسیل خودبخودی، میزانی تقویت خواهیم داشت. لذا از لحاظ تئوری با تزریق نور به داخل محیط فعال با توجه به رابطه (۳-۱۶) و افزایش توان ورودی، سیگنال تقویت شده و با افزایش بیشتر توان ورودی، سیگنال تا مرز اشباع تقویت گردیده و پس از آن، تقویت کننده به اشباع رفته و عمل تقویت متوقف خواهد شد. حال هرچه که طول تقویت کننده افزایش یابد، با توجه به رابطه (۳-۱۵) متوسط توان سیگنال نوری هم درون تقویت کننده کاهش یافته و از طرفی مؤلفه نخست در رابطه (۳-۱۶) هم با افزایش طول تقویت کننده، کاهش یافته و در نتیجه نرخ چگالی حامل نیز کاهش می‌یابد. متعاقب آن، ضریب بهره ماده و در نهایت بهره تقویت کننده هم کاهش خواهد یافت. حال با کاهش طول تقویت کننده (در نتیجه طول محیط فعال)، روندی که در تقویت کننده رخ خواهد داد، عکس فرآیند بالا بوده که نتیجه آن، افزایش بهره تقویت کننده خواهد بود. لذا همانطور که پیشتر هم بیان گردید، پارامترهای ساختاری محیط فعال که حجم محیط (V) را تشکیل می‌دهند یا به عبارت دیگر؛ طول (L)، عرض (w) و ارتفاع (d)، نقش به سزایی در کنترل مشخصه‌های اصلی تقویت کننده نوری به عهده دارند. لذا می‌توان با دانستن میزان تغییرات مشخصه‌های پاسخی هر تقویت کننده نسبت به تغییرات این پارامترها، محدوده تغییرات این مشخصه‌ها را تحلیل و نسبت به انتخاب و طراحی تقویت کننده اقدام نمود.

۴-۳-۴ بررسی و تحلیل اثر تغییر ضخامت لایه فعال بر ضریب تقویت و نویز انتشاری تقویت کننده

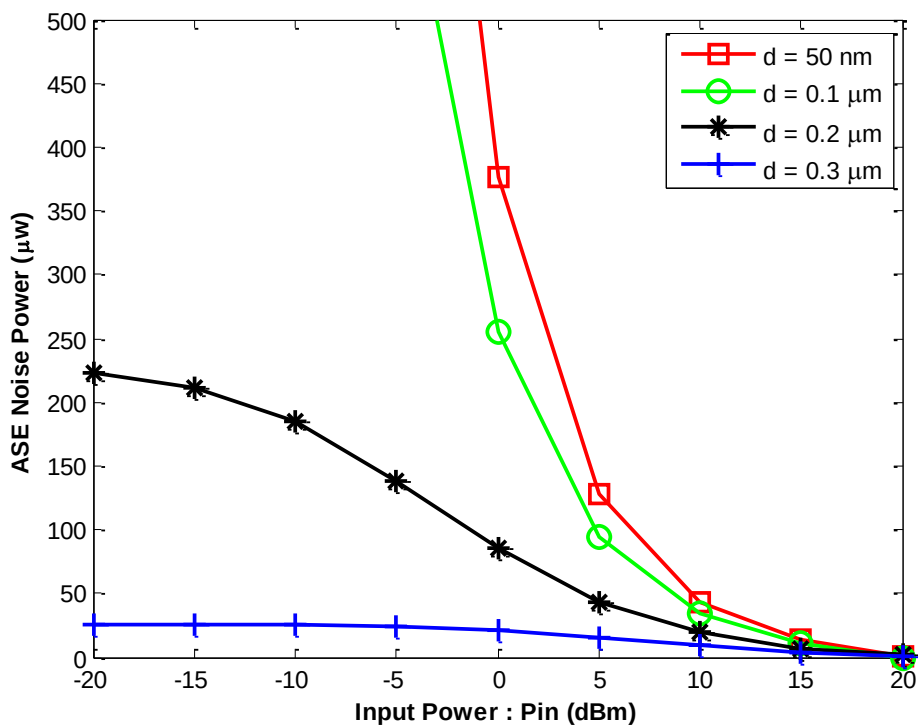
یکی دیگر از پارامترهای ساختاری داخلی تقویت کننده، ضخامت (ارتفاع) لایه فعال (d) می باشد که در این رساله از پارامترهایی بوده که امکان تغییر آن وجود داشته است. لذا در این بخش، سعی بر آن است که با تغییر ضخامت لایه فعال، تاثیر آن را بر روی ضریب تقویت و نویز انتشاری تقویت کننده بررسی و تحلیل نمائیم. بدین منظور در شکل (۴-۷) منحنی تغییر ضریب تقویت و توان نویز انتشاری خودبخودی به ازای توان ورودی در سه مقدار متفاوت ضخامت لایه فعال به میزان $0/1$ ، $0/2$ و $0/3$ میکرومتر به تصویر کشیده شده است. همانطور که در شکل (۴-۷-الف) مشاهده می نمائیم، با کاهش ضخامت لایه فعال (ارتفاع محیط)، ضریب تقویت افزایش می یابد ولی همانطور که می دانیم و در شکل (۴-۷-ب) هم نمایان است، توان نویز انتشاری خودبخودی هم به شدت تقویت می گردد. در آن سو با افزایش ضخامت لایه، ضریب تقویت به شدت کاهش یافته و متعاقب آن، نویز انتشاری هم کاهش می یابد. لذا بازهم نیازمند آن هستیم که این کمیت را در مقدار متعادل تنظیم نمائیم تا ضریب تقویت و نویز در حد مطلوبی قرار بگیرند. در این رساله برای دستیابی به ضریب تقویت مطلوب $17/05$ dB و توان نویز انتشاری $223 \mu W$ می بایست ضخامت لایه فعال را در حد بهینه $0/2$ میکرومتر، تنظیم نمود.

همانطور که بیان گردید، می توان با تغییر سایر پارامترها نظیر بهره تفاضلی (α_g)، نرخ چگالی حاملها در گذار (N_i) و افت داخلی موج بر نیز بر مشخصه های تقویت کننده مانند ضریب تقویت و توان نویز انتشاری نظارت نمود. ولی همانگونه که در ابتدای بحث نیز بیان گردید، در این پژوهش، این پارامترها را به صورت مستقیم از نتایج تجربی [۱۲] استخراج گردیده و از آنجا که مقدار این کمیتها وابسته به ساختار تقویت کننده بوده، لذا بر روی این پارامترها هیچ تغییری صورت پذیرفته و به طور مستقیم در شبیه سازیها به تقویت کننده اعمال شده اند.

علت افزایش بهره را به ازای کاهش ضخامت (ارتفاع) لایه فعال می توان بازهم به صورت تئوری در رابطه نرخ چگالی حامل (۳-۱۶) جستجو نمود. چرا که با تحلیل رابطه در می یابیم که ضخامت لایه که به طور مؤثر در حجم محیط فعال تاثیر می گذارد ($V = w.d.L$)، در مخرج عبارات اول و سوم سمت راست معادله نرخ قرا دارند، لذا با کاهش این پارامتر، نرخ چگالی حامل افزایش یافته و متعاقب آن نیز، بهره تقویت کننده و در نهایت ضریب تقویت هم که به شدت به بهره تقویت کننده (ضریب بهره) وابسته است، افزایش می یابد. با افزایش توان ورودی همانطور که انتظار می رود، این روند رو به کاهش خواهد گذاشت. در سویی دیگر با افزایش ضخامت لایه فعال، نور می بایست در محیط گسترده تری پخش شده و جریان بایاس هم باید در همین محیط گسترده تر تزریق گردد، لذا چگالی حامل رو به کاهش گذاشته و متعاقباً ضریب تقویت نیز کاهش خواهد یافت.



(الف)



(ب)

شکل ۴ - ۷: منحنی تاثیر تغییرات ضخامت لایه فعال (d) بر روی

(الف) ضریب تقویت و (ب) توان نویز انتشاری در تقویت کننده

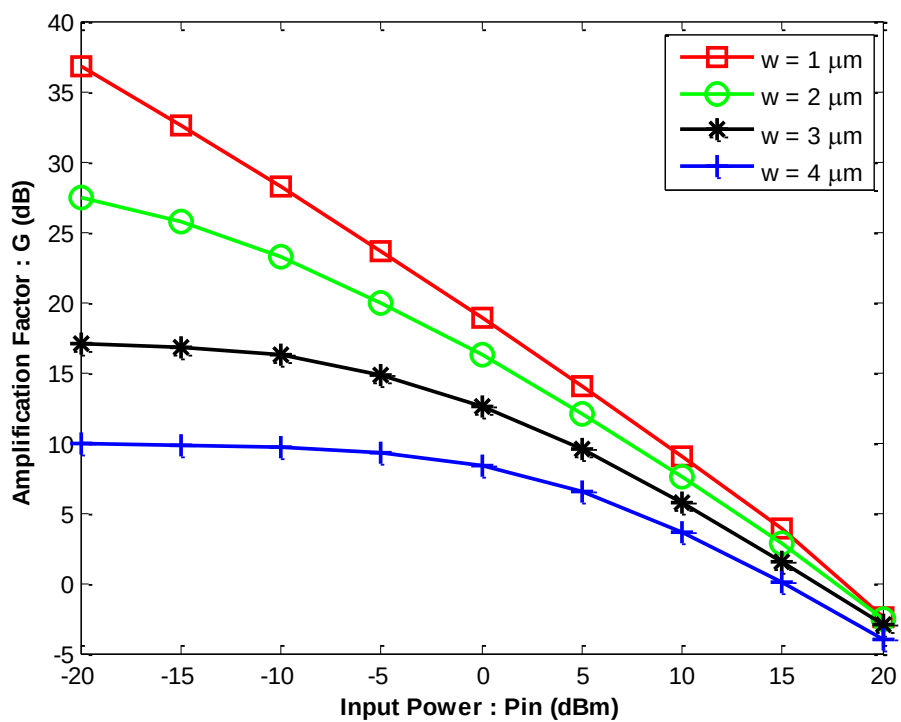
۴-۳-۵ بررسی و تحلیل اثر تغییر عرض محیط فعال بر ضریب تقویت و نویز انتشاری تقویت کننده

آخرین پارامتر ساختاری محیط فعال، عرض آن می باشد که همانطور که بیان گردید مقدار این پارامتر به طور مستقیم از پژوهش [۱۲] استخراج گردیده است، اما از آنجا که بررسی آن خالی از لطف نبوده، در این قسمت سعی بر آن است که تاثیر تغییرات این پارامتر را نیز بر افزایش یا کاهش ضریب تقویت و بالطبع توان نویز انتشاری، بررسی و تحلیل نمائیم.

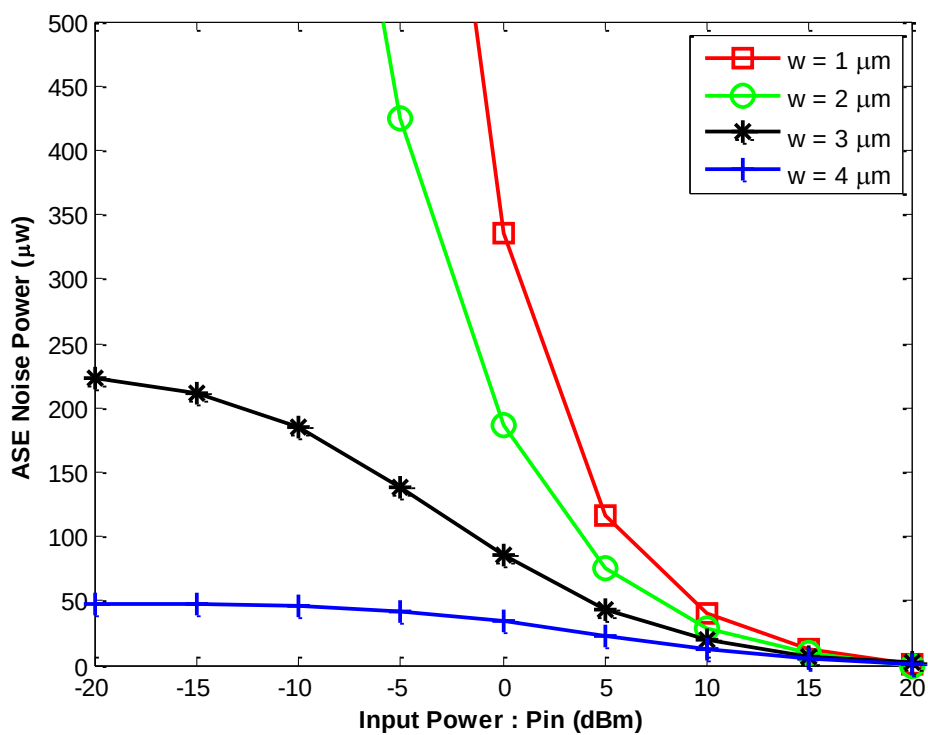
همانگونه که مشاهده می گردد، در شکل (۴-۸) منحنی تاثیر تغییرات ضریب تقویت و توان نویز انتشاری خودبخودی به ازای توان ورودی برای چهار مقدار متفاوت عرض لایه فعال ترسیم شده است. از لحاظ تئوری بازهم با تحلیل و بررسی رابطه (۳-۱۶) که مهمترین رابطه تحلیل در تقویت کننده های نوری نیمه هادی خواهد بود، در می یابیم که با افزایش این پارامتر، چون محیطی که نور وارد آن می گردد گسترده تر خواهد شد، لذا چگالی حامل کاهش یافته و متعاقباً ضریب تقویت نیز کاهش خواهد یافت. از لحاظ ریاضی هم چون عرض محیط فعال در حجم محیط تاثیر داشته و کمیت حجم محیط در منحنی کسر قرار دارد، لذا با افزایش حجم محیط، چگالی حامل و ضریب تقویت کاهش خواهند یافت.

در مقابل، با کاهش عرض مکانی که نور وارد می گردد، و توزیع شدن جریان تزریق در محیط متراکم تر، بنابراین طبیعی است که چگالی حامل های تولیدی به شدت افزایش یافته و با افزایش تراکم حاملها درون محیط فعال، نور ورودی با حامل های بیشتری برخورد نموده، لذا میزان فوتون های تولیدی نیز افزایش یافته و در نهایت، نور با ضریب بزرگتری تقویت می گردد. البته بازهم به این نکته اشاره می کنیم که می بایست ضریب تقویت را در حد مطلوبی تنظیم نمود تا نویز انتشاری خودبخودی که شیب افزایشی تندتری نسبت به بهره دارد، در حداقل ممکن تنظیم شود. از طرفی، با بررسی منحنی ضریب تقویت و توان نویز انتشاری خودبخودی در می یابیم که تغییرات این دو مشخصه، تقریباً مشابه با تغییرات ناشی از ضخامت لایه فعال خواهد بود، فقط با این تفاوت که مقدار تغییرات متفاوت است، ولی شمای کلی منحنی ها بسیار مشابه به یکدیگر می باشد. که این شباهت به این علت است که این دو کمیت (ضخامت و عرض محیط فعال) ماهیتی شبیه به یکدیگر داشته و حتی در تحلیل تئوری و ریاضی نیز در مکانی یکسان قرار دارند.

لذا با توجه بهینه سازی های انجام شده و استخراج مستقیم سایر پارامترها از پژوهش فوق، مشاهده می نمائیم که در جریان بایاس بهینه ۴۰۰ میلی آمپر، طول بهینه ۶۵۰ میکرومتر، ضریب تحدید نوری بهینه ۰/۳، ضخامت بهینه ۰/۲ میکرومتر و در نهایت عرض محیطی ۳ میکرومتر، همانطور که در تمام منحنی نمایان بود، می توان به ضریب تقویت مطلوب ۱۷/۰۵ دسی بل و توان نویز انتشاری ۲۲۳ میکرو وات در توان ورودی ۲۰ dBm - رسید، که با توجه به آنچه تا کنون توسط پژوهنده مورد بررسی قرار گرفته، تا حد زیادی نتایج پژوهشهای پیشین [بخصوص ۲۵] را بهبود بخشیده است.



(الف)



(ب)

شکل ۴ - ۸: منحنی تاثیر تغییر عرض محیط فعال (w) بر روی
 (الف) ضریب تقویت و (ب) توان نویز انتشاری خودبخودی

۴-۳-۶ خلاصه‌ای از تاثیر تغییر پارامترهای مختلف بر ضریب تقویت و نويز انتشاری تقویت کننده

در این بخش به طور اجمالی خلاصه‌ای از تاثیر تغییرات پارامترهای مختلف تقویت کننده را بر ضریب تقویت و توان نويز انتشاری بیان خواهیم نمود. همانطوری که مشاهده شد، برخی از پارامترها را که می‌توانستیم تغییر دهیم، مورد بررسی و کاوش قرار داده و مابقی را ثابت در نظر گرفته‌ایم. در ادامه به اختصار تاثیر تغییر این پارامترها را به صورت تیتروار بیان خواهیم نمود.

۱- تغییر در جریان بایاس تقویت کننده: با افزایش جریان بایاس، ضریب تقویت افزایش یافته

و متعاقب آن، نويز انتشاری هم افزایش می‌یابد. در مقابل، با کاهش میزان جریان تزریق، حاملهای کمتری تولید شده، لذا بهره تقویت کننده و به تبع آن نويز هم کاهش می‌یابد.

۲- تغییر در طول تقویت کننده: با افزایش طول تقویت کننده، ضریب تقویت و نويز انتشاری

کاهش می‌یابند. چرا که جریان ثابتی می‌بایست در محیط بزرگتری حاملهای بیشتری را تزریق نماید و همچنین نور ورودی هم می‌بایست مسیر طولانی‌تری را طی نماید، لذا بهره کاهش خواهد یافت.

۳- تغییر در ضخامت لایه فعال: با کاهش این پارامتر، ضریب تقویت به طور چشمگیری

افزایش یافته و متعاقب آن، نويز هم به شدت تقویت می‌گردد، چرا که نور در محیط کوچکتری قرار گرفته که تراکم حاملها در آن نقطه بیشتر بوده، لذا فوتون بیشتری تولید خواهد شد.

۴- تغییر در عرض محیط فعال: با افزایش عرض محیط فعال، ضریب تقویت کاهش یافته و

نويز انتشاری هم کاهش می‌یابد چرا که همانطور که بیان گردید، نور ورودی در محیط گسترده‌تری قرار گرفته و با توجه به اینکه جریان بایاس ثابتی هم در همین محیط تزریق شده است، لذا حاملهای کمتری تولید شده و در نتیجه فوتونهای کمتری تحریک می‌گردند.

۵- تغییر ضریب تحدید نوری: با افزایش این پارامتر، ضریب تقویت هم افزایش یافته ولی

نويز انتشاری هم افزایش می‌یابد.

بعلاوه، سایر پارامترهای تقویت کننده نظیر ضریب بهره تفاضلی (α_g) چگالی حاملها در گذار (N_t)،

ضرایب بازترکیب تشعشعی (B_{rad})، غیر تشعشعی (A_{nr}) و اوژه (C_{aug})، تلفات داخلی موج‌بر (α_p) و ... همگی وابسته به ساختار تقویت کننده بوده و بررسی و تحلیل تغییرات بوجود آمده در این پارامترها از حوصله این بحث خارج خواهد بود چرا که باعث گستردگی بیش از حد موضوع خواهد شد و اثری در مباحث این پژوهش نخواهند داشت. در جدول (۴-۱) چکیده‌ای از این تاثیرات لیست شده است.

جدول ۴ - ۱: چکیده ای از تاثیر تغيير پارامترهای مختلف بر ضريب تقويت و نويز انتشاری تقويت کننده

تغيير پارامتر مورد تحليل	تغييرات مشخصه ضريب تقويت	تغييرات مشخصه توان نويز انتشاری
افزايش جريان باياس	افزايش می يابد	افزايش می يابد
افزايش ضريب تحديد نوری	افزايش می يابد	افزايش می يابد
افزايش ضخامت لایه فعال	به شدت کاهش می يابد	به طور چشمگیری کاهش می يابد
افزايش عرض محیط فعال	به طور چشمگیری کاهش می يابد	کاهش می يابد
افزايش طول تقويت کننده	کاهش می يابد	کاهش می يابد

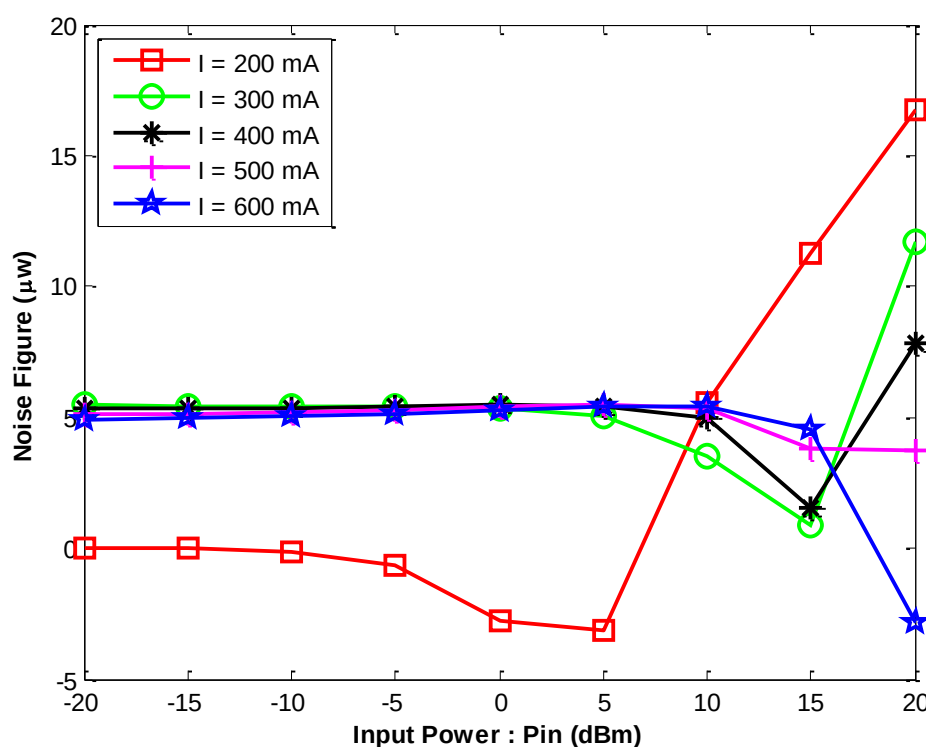
۴-۴ تحليل و بررسی مشخصه نویزی و بهره نوری در تقویت کننده نوری نیمه هادی (SOA) ارائه شده

مهمترین نکته‌ای که ابتدا به ذهن پژوهنده می‌رسد این است که با جمع بندی مباحث و تحلیل‌های ارائه شده در بخش پیشین و مطالعه و آنالیز نوشتارهای مرتبط با موضوع، می‌توان نتیجه گرفت که پس از انتخاب و طراحی تقویت کننده، تنها پارامتری که به ساختار تقویت کننده وابسته نبوده و می‌توان آن را به طور مستقل و جداگانه کنترل نمود، جريان باياس تقویت کننده می‌باشد که از خارج به محیط فعال (موج‌بر) درون تقویت کننده تزریق شده و باعث تحریک حاملها درون محیط فعال می‌گردد که این تحریک باعث گذار حاملها از باند هدایت به باند ظرفیت شده و با اعمال نور ورودی به محیط فعال، فوتون تابشی با الکترون تحریک شده برخورد کرده و باعث تولید فوتونی با راستا و فازی مشابه با سیگنال ورودی می‌گردد. لذا با اعمال میزان نور ورودی بیشتر در محیط مناسب، فوتونهای تحریکی بیشتر شده و بنابراین فوتونهای تولیدی نیز افزایش خواهند یافت، لذا نور ورودی با ضریب مناسبی تقویت خواهد گشت.

۴-۴-۱ مشخصه نویزی (نویز فیگر) مدل تقویت کننده نوری نیمه هادی ارائه شده

همانطور که می‌دانیم همزمان با تقویت سیگنال، نویز انتشاری خودبخودی نیز تقویت گشته و سایر مشخصه‌های تقویت کننده را دستخوش تغییرات خواهد کرد. لذا می‌بایست کنترل دقیق را بر روی میزان تقویت سیگنال انجام داده تا نویز نیز در حد مطلوبی باقی بماند. همچنین کمیت دیگری که متناسب با سیگنال ورودی تغییر می‌نماید، توان ورودی تقویت کننده بوده که در تمام بهینه سازی‌ها یکی از پارامترهای اصلی در تحلیل می‌باشد. لذا از این پس، کلیه تغییرات را در جريان باياس تقویت کننده و توان ورودی انجام خواهیم داد. بنابراین، پس از بررسی و تحلیل ضریب تقویت و توان نویز انتشاری و بهینه سازی پارامترهای ساختاری تقویت کننده برای دستیابی به ضریب تقویت مطلوب و توان نویز انتشاری اندک، اینک می‌بایست تقویت کننده را از لحاظ مشخصه نویزی یا اصطلاحاً نویز فیگر نیز مورد ارزیابی و تحلیل قرار

داد. بدین منظور در شکل (۴-۹) مشخصه نویزی^۱ تقویت کننده (نویز فیگر) که بیانگر میزان حساسیت تقویت کننده به دریافت نویز می باشد، نشان داده شده است. لذا با بهینه کردن پارامترهای ساختاری تقویت کننده، نظیر طول و ضخامت محیط فعال، این مشخصه برای تغییرات توان ورودی از -20 dBm تا 20 dBm و در پنج جریانهای بایاس متفاوت مورد ارزیابی قرار گرفته است. همانگونه که نمایان است، نویز فیگر تقریباً برای تمامی جریانهای بایاس تا توان ورودی 15 dBm اندک می باشد. همانطور که بیان گردید، توان اشباع ورودی در حد 13 dBm می باشد، لذا نویز فیگر هم تا این توان ورودی، مقدار اندکی دارد و برای جریان بایاس بهینه 400 میلی آمپر، تا توان ورودی 10 dBm، در حدود 5 دسی بل می باشد که در مقایسه با [۲۵] بسیار بهبود یافته است. با استناد به [۳ و ۸] برای تقویت کننده های نوری نیمه هادی موج رونده، نویز فیگر می بایست در حد 5 تا 7 دسی بل باشد که تقریباً در تمامی جریانهای بایاس مورد تحلیل، تقویت کننده نویز فیگر مطلوبی از خود نشان می دهد، لذا مدل ارائه شده هم از لحاظ ضریب تقویت، هم از لحاظ نویز انتشاری خودبخودی و هم از لحاظ مشخصه نویزی، رفتار مطلوبی از خود نشان می دهد.



شکل ۴ - ۹: تغییرات نویز فیگر به ازای تغییرات توان ورودی در جریان های بایاس مختلف.

از طرفی، همانگونه که در فصل دوم و سوم نیز بیان گردید، یکی از پارامترهایی که نقشی کلیدی را در تقویت کننده های نوری نیمه هادی ایفا می نماید، توان اشباع ورودی است، چرا که می بایست کنترل

دقیقی بر روی میزان توان ورودی تقویت کننده در سیستم مخابراتی انجام داد تا از توان اشباع فراتر نرود، چرا که این امر تقویت کننده را به حالت غیرخطی برده و برای تقویت سیگنال نا مناسب نماید. لذا با بررسی منحنی‌های رسم شده و همچنین محاسبه رابطه زیر می‌توان توان اشباع ورودی را برای مدل ارائه شده در این مقاله تخمین زد [۳]:

$$P_s = \frac{h\nu wd}{\alpha_g \tau_c \Gamma} \quad (1-4)$$

در این رابطه، P_s توان اشباع ورودی، h ثابت پلانک، ν فرکانس نوری، w عرض لایه فعال، d ضخامت لایه فعال، α_g بهره تفاضلی و τ_c طول عمر حاملها می‌باشد. که با توجه به مباحث گفته شده مقدار متناظر هر یک برابر است با:

$$h = 6.626 \times 10^{-34} \text{ J} \quad \nu = 193.414 \text{ THz} \quad w = 3 \mu\text{m} \quad d = 0.2 \mu\text{m} \quad \alpha_g = 2.5 \times 10^{-20} \text{ m}^2$$

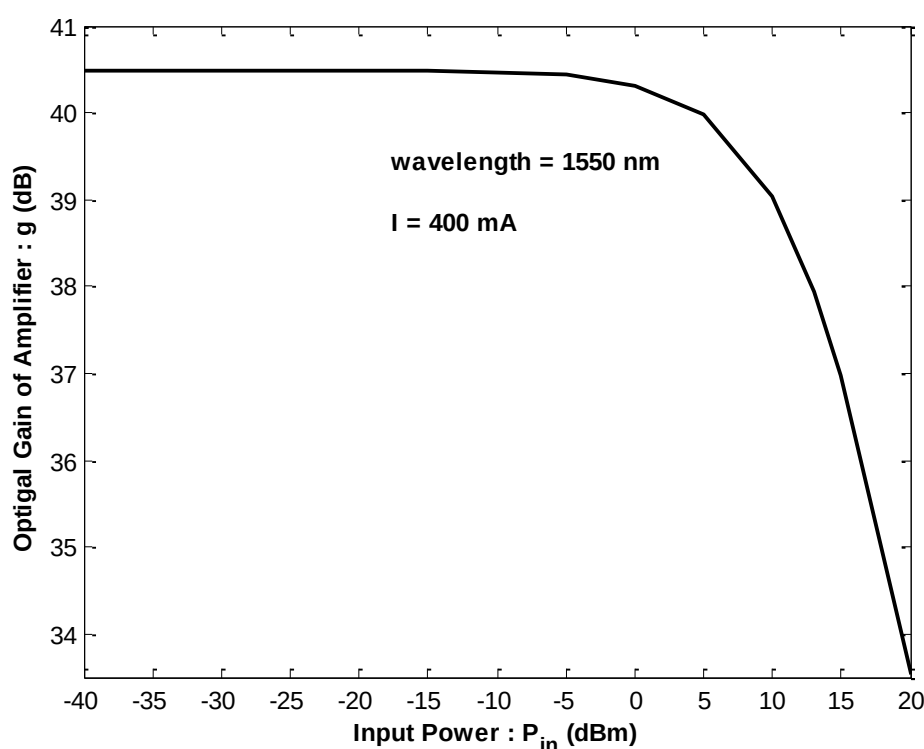
لذا با استفاده از رابطه (۳-۱۸) میزان طول عمر حاملها برای مدل تقویت کننده نوری نیمه هادی ارائه شده در این مقاله، به طور متوسط برابر خواهد بود با ۰/۴۶۶ ns و بدین ترتیب توان اشباع ورودی تقویت کننده با محاسبه رابطه بالا به میزان ۲۱/۹۸ mW (یا همان ۱۳/۴۲ dBm) بدست می‌آید که در مقایسه با [۱۸ و ۲۵] بهبود یافته است و این امر بدان معنی است که تقویت کننده می‌تواند سیگنالهای ورودی تا توان ۱۳/۴۲ dBm را بدون اعمال هیچگونه اثر غیرخطی تقویت نماید. با اندکی بررسی منحنی‌های (۴-۲)، (۴-۴) و (۴-۵) نیز می‌توان مکان توان اشباع را مشاهده نمود.

۴-۴-۲ مشخصه بهره نوری (ضریب بهره) مدل تقویت کننده نوری نیمه هادی ارائه شده

یکی دیگر از مشخصه‌های مهم تقویت کننده‌های نوری نیمه هادی، بهره نوری تقویت کننده یا به اصطلاح ضریب بهره تقویت کننده (g) می‌باشد. لذا منحنی ضریب بهره تقویت کننده به ازای تغییرات توان ورودی محاسبه و در شکل (۴-۱۰) به تصویر کشیده شده است. در جریان بایاس بهینه ۴۰۰ میلی آمپر و در طول موج ۱۵۵۰ نانومتر و تا توان ورودی ۱ میلی وات، بهره نوری مطلوب و یکنواخت ۴۰/۵ دسی بل؛ تا توان ورودی ۵ dBm بهره مطلوب ۴۰ dB و نهایتاً تا توان ورودی ۱۰ dBm بهره مطلوب ۳۹ dB بدست می‌آید که در مقایسه با [۱۴ و ۲۵] بسیار بهبود یافته است. بهره نوری یکی از پارامترهای مهم در هر تقویت کننده نوری می‌باشد، چرا که هر چه که بتوان بهره نوری یکنواخت و مطلوبی را ایجاد نمود، لذا طیف بهره مطلوب‌تری دریافت خواهیم نمود. یکی از مشخصه‌های مطلوب هر تقویت کننده نوری نیمه هادی همین هموار بودن و گسترده بودن طیف بهره خواهد بود.

همانطور که مشاهده نمودیم، در تحلیل و بکارگیری تقویت کننده‌های نوری نیمه هادی، تغییرات جریان بایاس تقویت کننده (جریان تزریق)، تاثیر شدیدی در بهره سیگنال و توان دریافتی و در نتیجه

عملکرد تقویت کننده در سیستم مخابراتی خواهد داشت. لذا با گزینش مقدار مناسبی برای جریان بایاس و بهینه سازی تقویت کننده، می توان به نتایج مطلوبی دست یافت. بنابراین با مستندات ارائه شده و بررسی های انجام شده بر روی تقویت کننده های نوری نیمه هادی، می توان جریان تزریق ۴۰۰ میلی آمپر را به عنوان جریان بایاس بهینه در نظر گرفت. از طرف دیگر، همانطور که در شکل (۴-۱۰) نشان داده شده است، تقویت کننده نوری نیمه هادی در این محدوده، بهره نوری ثابت ۴۰/۵ دسی بل را از خود نشان می دهد که چنین بهره ثابتی، ظرفیت انتقال بسیار بالایی را در سیستم مخابراتی فراهم می نماید.



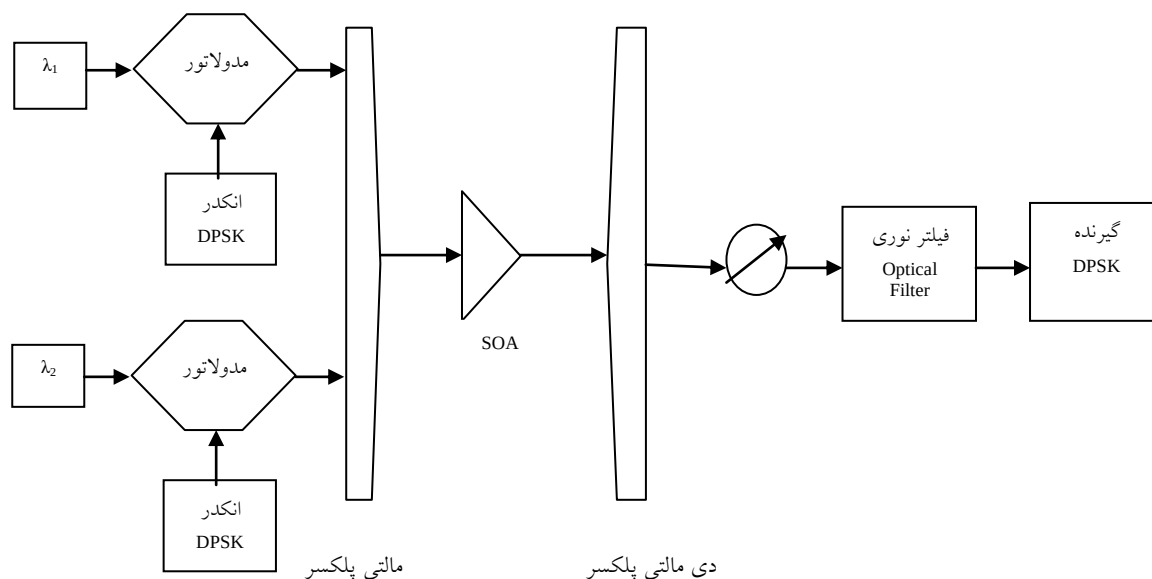
شکل ۴ - ۱۰: منحنی تغییرات بهره نوری تقویت کننده نوری نیمه هادی به ازای تغییرات توان ورودی

۴-۵ بررسی تداخل کانالی (کراس تاک) القا شده توسط SOA در سیستمهای DWDM

یکی از مهمترین ملاحظات طراحی در بکارگیری تقویت کننده های نوری نیمه هادی که نقش بسزایی را در عملکرد تقویت کننده در سیستمهای مخابراتی ایفا می کند و می بایست مورد توجه بسیار قرار گیرد این است که در هنگام انتقال دو یا چند سیگنال به طور همزمان از طریق یک تقویت کننده نوری نیمه هادی (SOA) در سیستم مخابراتی، بین کانالها تداخل صوتی^۱ (کراس تاک) رخ می دهد. بنابراین نیازمند آن هستیم که عملکرد تقویت کننده را برای انتقال چند کانال مورد ارزیابی و تحلیل قرار داده، تا بتوان کراس تاک را در سیستم مخابراتی به حداقل رساند. در همین راستا می توان مدل ارائه شده را برای انتقال چند سیگنال به

1 - Crosstalk

طور همزمان، بهبود بخشید و مدل انتقال چند کاناله را ارائه نمود. لذا با بررسی‌های انجام شده، مدل نشان داده شده در شکل (۴-۱۱) برای شبیه سازی عملکرد انتقال دو سیگنال مخابراتی با فرمت مدولاسیون^۱ DPSK، معرفی می‌گردد [۲۵] و همانطور که در فصل سوم نیز بیان شد، این مدل را برای انتقال سیگنالهای DPSK چند کاناله با بکارگیری فیبر شیفته دهنده پاشندگی و فیبر تک مد گسترش خواهیم داد. برای شبیه سازی رفتار تقویت کننده، در انتقال دو سیگنال DPSK، سیگنال ورودی را با توان‌های متفاوت و جریانهای بایاس مختلف، تغییر داده تا بتوان تداخل صوتی (کراس تاک) را اندازه‌گیری نمود.

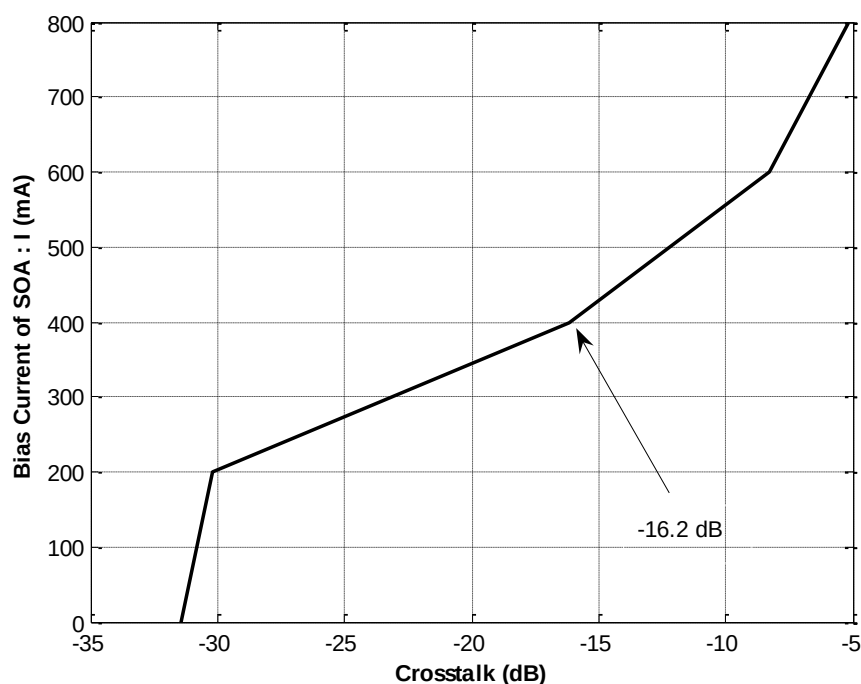


شکل ۴ - ۱۱: مدل ارائه شده برای ارزیابی کراس تاک در سیستم انتقال DWDM دو کاناله

لذا یکی از مهمترین پارامترها جهت ارزیابی تأثیرات بکارگیری تقویت کننده‌های نوری نیمه هادی در سیستمهای مخابراتی DWDM بررسی تداخل بین کانالی القا شده توسط این تقویت کننده‌ها است، چرا که تداخل بین کانالی (کراس تاک) مستقیماً بر تعداد کانالها و فاصله کانالی و نتیجتاً عملکرد سیستم انتقال تأثیر می‌گذارد. همانطور که می‌دانیم، در سیستمهای DWDM فاصله کانالی بسیار کمتر از WDM می‌باشد، لذا می‌بایست کراس تاک را تا حد امکان به حداقل رساند. از این رو مشخصه مدل تقویت کننده نوری نیمه هادی را برای دو کانال نیز مورد ارزیابی قرار داده تا بتوان تداخل بین کانالی را محاسبه نمود. بنابراین شبیه سازی را برای سیستم نشان داده شده در شکل (۴-۱۱) با تغییر در جریان بایاس تقویت کننده انجام داده و تداخل بین کانالی را توسط رابطه زیر محاسبه می‌نماییم [۶]:

$$\text{Crosstalk} = \frac{P_{1,\text{out}}(P_{2,\text{in}} = \text{off}) - P_{1,\text{out}}(P_{2,\text{in}} = \text{on})}{P_{1,\text{out}}(P_{2,\text{in}} = \text{off})} \quad (۲-۴)$$

در این رابطه، $P_{2,in}$ توان ورودی و $P_{1,out}$ توان خروجی تقویت کننده بوده و اندیس ۱ و ۲ نشان دهنده طول موج دو سیگنال می باشد. برای اندازه گیری تداخل کانالی (کراس تاک) توان ورودی دو سیگنال را -20 dBm در نظر گرفته و به منظور تنظیم فاصله کانالی در ۲۰ گیگاهرتز، با در نظر گرفتن فرکانس کانال شماره ۱ به میزان $193/414$ تراهرتز (1550 نانومتر)، می بایست کانال شماره ۲ را یا ۲۰ گیگاهرتز بالاتر و یا ۲۰ گیگاهرتز پایین تر در نظر بگیریم، لذا حالت دوم را برگزیده و فرکانس کانال شماره ۲ را برابر با $193/394$ تراهرتز ($1550/164$ نانومتر) در نظر می گیریم. به منظور ارزیابی کراس تاک، منحنی مشخصه تداخل کانالی را برای دو حالت بررسی کرده، یکی به ازای جریان بایاس تقویت کننده که در شکل (۴-۱۲) به تصویر کشیده شده و دیگری به ازای توان ورودی در سه جریان بایاس مختلف که در شکل (۴-۱۳) نشان داده شده است. برای حالت نخست، ابتدا سیستم را برای تک کانال مورد ارزیابی قرار داده و $P_{1,out}$ را محاسبه کرده، سپس سیستم را با در نظر گرفته دو کانال نیز مورد ارزیابی قرار داده و $P_{1,out}$ را بدست آورده و در نهایت با توجه به رابطه بالا کراس تاک را محاسبه نموده ایم، که حاصل را در شکل (۴-۱۲) مشاهده می کنیم.

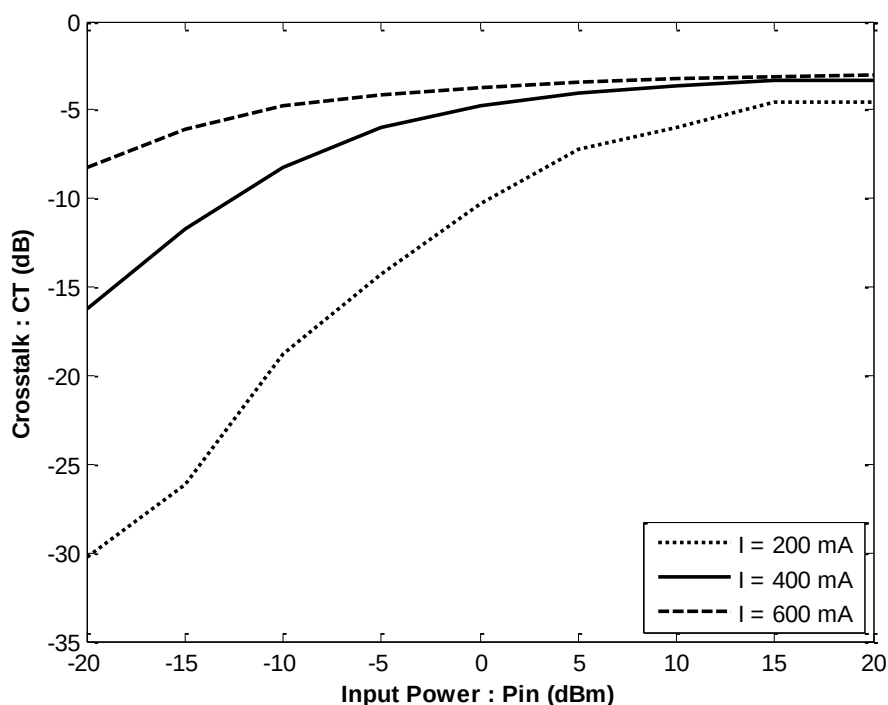


شکل ۴ - ۱۲: تغییرات کراس تاک به صورت تابعی از تغییرات جریان بایاس تقویت کننده در فاصله کانال ۲۰ گیگاهرتز

در حین ارزیابی تداخل کانالی مشاهده نمودیم که با افزایش جریان بایاس، کراس تاک افزایش می یابد چرا که افزایش جریان بایاس، باعث افزایش بهره شده و افزایش بهره نیز باعث القای آن از فرکانسی به فرکانس دیگر خواهد شد. که این امر، با مطالب بیان شده در [۳] تطابق خوبی دارد. اما همانطور که در

شکل (۴-۱۲) مشاهده می‌نمائیم، در جریان بایاس ۴۰۰ میلی آمپر، برای تقویت کننده نوری نیمه هادی ارائه شده در این مقاله و با فرمت مدولاسیون RZ-DPSK با فاصله کانال ۲۰ گیگاهرتز و توان ورودی -۲۰ dBm کراس تاک محاسبه شده برابر با ۱۶/۲- دسی بل می‌باشد که در مقایسه با [۲۵] بسیار کمتر است.

در مرحله بعد با تغییر توان ورودی تقویت کننده در چند جریان بایاس به منحنی متفاوتی برای کراس تاک دست خواهیم یافت. نتیجه این ارزیابی را در شکل (۴-۱۳) مشاهده می‌نمائیم. برای تحلیل و اندازه‌گیری کراس تاک در این حالت نیز، از همان رابطه (۴-۲) استفاده کرده و در فاصله کانالی ۲۰ گیگاهرتز و با توان ورودی متغیر، سیستم نشان داده شده در شکل (۴-۱۱) را مورد آزمایش قرار داده و دوباره با بکارگیری رابطه (۴-۲) تداخل کانالی را محاسبه نموده‌ایم.



شکل ۴ - ۱۳ : منحنی تغییرات کراس تاک به ازای تغییرات توان ورودی در سه جریان بایاس مختلف

این منحنی به شکلی دیگر به کراس تاک می‌نگرد، چرا که میزان تغییرات تداخل کانالی را با افزایش توان ورودی مشخص می‌نماید. همانطور که نمایان است و همچنین انتظار می‌رفت، با افزایش توان ورودی و جریان بایاس، کراس تاک نیز رو به افزایش می‌گذارد. علت این پدیده این است که با افزایش توان ورودی، میزان نفوذ نور به خارج از محیط فعال نیز بیشتر شده و در همین حال، اگر سیگنال دیگری با همین توان ورودی وارد تقویت کننده گردد، لذا میدانهای نوری دو سیگنال بر یکدیگر تاثیر گذاشته و باعث بوجود آمدن تداخل می‌گردد. اما همانطور که انتظار می‌رفت این تداخل، با افزایش توان سیگنال ورودی رو به افزایش می‌گذارد تا زمانی که تقویت کننده به اشباع برسد (در محدوده ۱۳ dBm) و از آن پس، کراس

تاک هم مشابه با دیگر مشخصه‌های تقویت کننده، تقریباً ثابت می‌گردد. در این منحنی هم نمایان است که در توان ورودی -20 dBm در جریان بایاس 400 میلی آمپر و با بهینه سازی پارامترهای ساختاری تقویت کننده، توانسته‌ایم کراس تاک را به $16/2$ dB برسانیم که همانطور که بیان شد، نسبت به سایر پژوهشها [۶ و ۲۵] بسیار کاهش یافته است. در جدول (۴-۲) پارامترهای مورد استفاده در این رساله به صورت مقایسه‌ای با پارامترهای مورد استفاده در پژوهش سینگ و کالر [۲۵] که مبنای اولیه این پایان نامه بوده، بیان گردیده است. همانطور که در جدول (۴-۲) هم نشان داده شده است، در اکثر پژوهش‌های پیشین (بخصوص [۲۵]) پارامتر طول عمر حاملها و نرخ گسیل خودبخودی (نرخ وارونگی جمعیت) ثابت در نظر گرفته شده و بعلاوه پارامترهای ساختاری بازترکیب، اصلاً در نظر گرفته نشده‌اند. بنابراین برای ارائه تحلیلی دقیق‌تر و معرفی مدلی معتبر، در این رساله پارامترها به صورت صحیح در نظر گرفته شده‌اند.

جدول ۴ - ۲: مقایسه کیفی پارامترهای مورد استفاده و بهینه شده در پژوهش سینگ و کالر [۲۵] و رساله حاضر

پارامتر	مدل ارائه شده توسط [۲۵]	مدل ارائه شده توسط پژوهنده
جریان بایاس (I)	400 میلی آمپر	400 میلی آمپر
طول محیط فعال (L)	750 میکرومتر	650 میکرومتر
پهنای لایه فعال (w)	2 میکرومتر	3 میکرومتر
ضخامت لایه فعال (d)	0.2 میکرومتر	0.2 میکرومتر
ضریب تحدید نوری (I)	0.4	0.3
چگالی حامل در گذار (N_p)	$1/5 \times 10^{-24} \text{ m}^{-3}$	$1/1 \times 10^{-24} \text{ m}^{-3}$
بهره تفاضلی (α_g)	$2 \times 10^{-20} \text{ m}^{-2}$	$2/5 \times 10^{-20} \text{ cm}^{-2}$
تلفات ماده (α_p)	1050 m^{-1}	3000 m^{-1}
ضریب گسیل خودبخودی (N_{sp})	2	وابسته به چگالی حامل
طول عمر حاملها (τ_c)	300 پیکوثانیه	وابسته به ضرایب بازترکیب
ضریب بازترکیب غیر تشعشعی (A_{nr})	در نظر گرفته نشده	$5 \times 10^{-1} \text{ s}^{-1}$
ضریب بازترکیب تشعشعی (B_{rad})	در نظر گرفته نشده	$5 \times 10^{-10} \text{ cm}^3/\text{s}$
ضریب بازترکیب اوزه (C_{aug})	در نظر گرفته نشده	$1 \times 10^{-28} \text{ cm}^6/\text{s}$

در جدول (۳-۴) نتایج حاصل از شبیه سازی رفتار تقویت کننده و بهینه سازی آن در پژوهش حاضر و پژوهش سینگ و کالر [۲۵] به صورت مقایسه‌ای و کیفی به تصویر کشیده شده است. همانطور که بیان شد و در جدول (۳-۴) نیز مشاهده می‌نمائیم، نتایج بدست آمده در این پژوهش به میزان بسیار زیادی با آنچه که در نوشتارهای [۳، ۶، ۲۵ و ۳۰] بیان شده سازگاری داشته و در برخی از حوزه‌ها دستاوردهای این پژوهش‌ها را تا حد زیادی بهبود بخشیده است.

جدول ۴ - ۳: مقایسه نتایج حاصل از شبیه سازی تقویت کننده در این رساله و پژوهش [۲۵]

مشخصه	مدل ارائه شده توسط سینگ و کالر [۲۵]	مدل ارائه شده در این رساله
نوع تقویت کننده	TWA از جنس InGaAlAs	TWA از جنس GaInAsP
توان ورودی مورد نظر	-۲۰ dBm	-۲۰ dBm
تعداد کانالها	۱۰ کانال	۱۰ کانال
نرخ بیت	۱۰ GB/s	۱۰ GB/s
فاصله کانالی	۲۰ GHz	۲۰ GHz
ضریب تقویت (G)	۱۶ dB	۱۷/۰۵ dB
توان نویز انتشاری خودبخودی (P_{ASE})	۲۲۷ μ w	۲۲۳ μ w
بهره نوری تقویت کننده (g)	۳۶/۵ dB	۴۰/۵ dB
تداخل کانالی (Cross Talk)	-۱۴/۱ dB	-۱۶/۲ dB
توان اشباع ورودی (P_s)	۲۱/۳۶ mW	۲۲ mW

با نگاهی به جدول فوق در می‌یابیم که مدل تقویت کننده نوری نیمه هادی ارائه شده در این رساله، توانسته است مشخصه‌های اصلی تقویت کننده نوری نیمه هادی مورد نظر را تا حد امکان بهبود بخشد. تنها نکته قابل بحث این است، که با تغییر ساختار تقویت کننده (جنس نیمه هادی مورد استفاده) توانسته‌ایم، تقویت کننده‌ای را ارائه کنیم که در شرایط یکسان، عملکرد بهتری از خود نشان دهد. هدف اصلی، این پژوهش نیز، افزایش بهره تقویت کننده بوده است. لذا با بکارگیری تقویت کننده ارائه شده در [۱۲] که ساختاری از جنس GaInAsP داشته و بکارگیری پارامترهای آن، توانسته‌ایم، تقویت کننده‌ای ارائه کنیم که نسبت به مدل مشابه خود، عملکرد بهتری نشان دهد. بنابراین، با توجه به مباحث گفته شده و تحلیل نتایج بدست آمده، می‌توان بیان نمود که در جریان بایاس بهینه ۴۰۰ میلی آمپر و در توان ورودی -۲۰ dBm و با بهینه سازی پارامترهای ساختاری تقویت کننده، می‌توان برای مدل تقویت کننده نوری نیمه هادی (SOA) درون خطی ارائه شده به ضریب تقویت مطلوب، توان نویز انتشاری اندک، تداخل بین کانالی (کراس تاک) کم و نویز فیگر اندکی در سیستم انتقال مالتی پلکس با تقسیم فشردۀ طول موج (DWDM) با فرمت مدولاسیون RZ-DPSK در فاصله کانالی ۲۰ گیگاهرتز دست یافت.

۴-۶ بکارگیری مدل تقویت کننده نوری نیمه هادی ارائه شده در سیستم انتقال DWDM

پس از بررسی، تحلیل، مدل سازی و بهینه سازی تقویت کننده نوری نیمه هادی ارائه شده، اینک زمان آن رسیده است که این مدل را در سیستم انتقال سیگنالهای DWDM نیز بکار گرفته و عملکرد سیستم را با بکارگیری تقویت کننده های نوری نیمه هادی بهینه شده چند طبقه مورد ارزیابی و تحلیل قرار دهیم که تا حد امکان بتوان سیستم را از نقطه نظر انتقال سیگنال، بهینه نمود. در راستای انتقال سیگنال در سیستمهای مخابراتی نیازمند آن هستیم که اولاً طرحی را برای انتقال سیگنال معرفی کرده و ثانياً عملکرد طرح را مورد ارزیابی قرار دهیم. از طرفی همانطور که بیان گردید، علیرغم افت ذاتی اندک فیبرنوری، بازهم در فواصل انتقال دوربرد، این تلفات تجمع شده و باعث افت شدید سیگنال ارسالی خواهند شد. لذا به منظور غلبه بر تلفات فیبر نوری در فواصل دوربرد، نیازمند بکارگیری تقویت کننده های نوری پر قدرت و پر بازدهی می باشیم که تمامی کانالها را در طول مسیر انتقال به طور مستقیم تقویت کرده و سیگنال ارسالی را با توان مطلوب و نویز اندک انتقال دهند. به همین منظور در فواصل مشخص، می بایست از گستره های تقویتی برای انتقال سیگنال استفاده می کنیم.

این گستره ها عموماً شامل چند کیلومتر فیبر تک مد^۱ که معمولاً به نام SMF-28 شناخته شده، یک یا چند کیلومتر فیبر جبران کننده پاشندگی^۲ یا DCF برای جبران اثرات غیر خطی و پاشندگی فیبرنوری و در نهایت یک تقویت کننده نوری نیمه هادی (SOA) در انتهای گستره می باشند [۳]. با توجه به فاصله انتقال سیگنال می بایست از گستره های تقویتی به مقدار نیاز استفاده نمود. نکته بسیار مهمی که در طراحی سیستم انتقال می بایست مد نظر قرار بگیرد این است که نحوه چیدمان این گستره ها در طول مسیر انتقال به شدت بر عملکرد سیستم تاثیر خواهد گذاشت. لذا این گستره های تقویتی می بایست تا حد امکان بهینه گردند، تا چینش متوالی آنها در طول مسیر انتقال نیز باعث بهینه سازی سیستم شود.

در همین راستا، این بخش به دو قسمت اصلی تقسیم شده است. در قسمت اول، با بکارگیری چند کیلومتر فیبر تک مد، چند کیلومتر فیبر جبران کننده پاشندگی و یک تقویت کننده نوری نیمه هادی به عنوان تقویت کننده درون خطی، یک گستره تقویتی را شکل داده و عملکرد آن را برای انتقال ۱۰ کانال DWDM با نرخ بیت ۱۰ گیگابیت بر ثانیه و با فرمت مدولاسیون RZ-DPSK در فاصله کانالی ۲۰ گیگاهرتز تا فاصله انتقال اندکی (۷۳/۵ کیلومتر) مورد ارزیابی و تحلیل قرار خواهیم داد و نتایج حاصل از شبیه سازی این گستره تقویتی را با بکارگیری تقویت کننده نوری نیمه هادی بهینه شده نشان داده و به بحث و تفسیر پیرامون این نتایج خواهیم پرداخت. در قسمت دوم، با بکارگیری تقویت کننده های نوری نیمه هادی بهینه

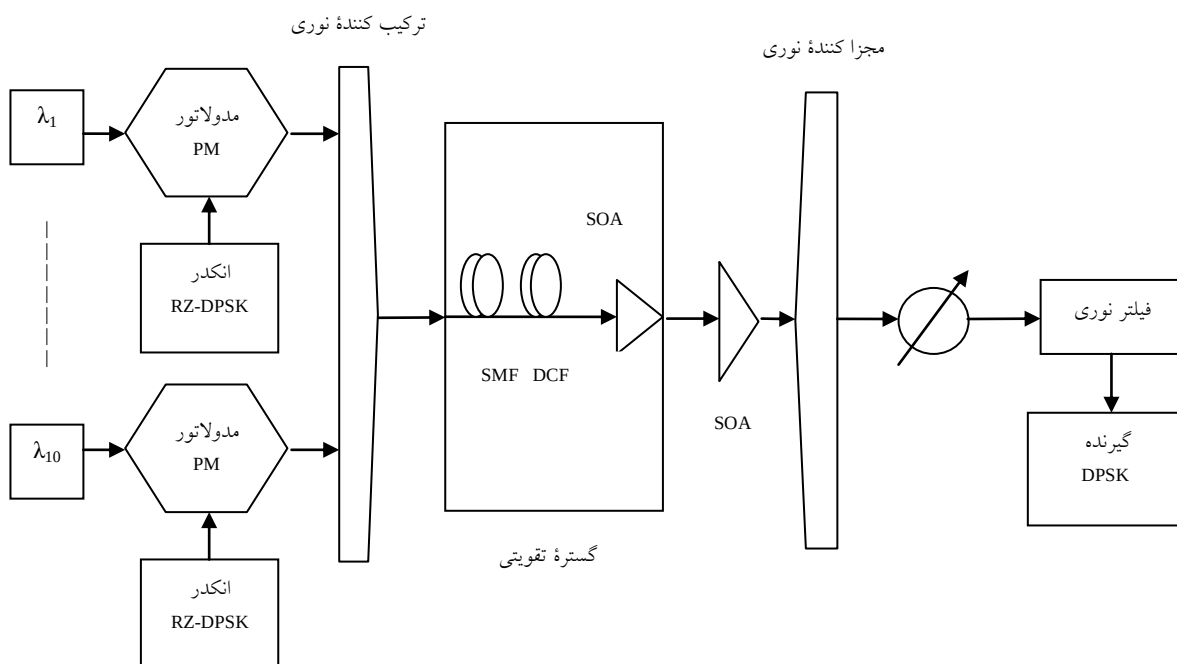
1 - Single Mode Fiber (SMF)

2 - Dispersion Compensating Fiber (DCF)

شده به صورت تقویت کننده‌های درون خطی در گستره‌های تقویتی متوالی، کارایی سیستم انتقال را برای انتقال ۱۰ کانال DWDM با نرخ بیت ۱۰ گیگابیت بر ثانیه و با فرمت مدولاسیون RZ-DPSK در فاصله کانالی ۲۰ گیگاهرتز، تا فواصل انتقال دوربرد (۴۱۹۰ کیلومتر) مورد ارزیابی قرار داده و با ارائه نتایج حاصل از شبیه سازی سیستم انتقال و تحلیل و ارزیابی نتایج، بحث را به پایان خواهیم رساند.

۴-۶-۱ شبیه سازی، ارزیابی و تحلیل عملکرد سیستم انتقال تا فاصله انتقال ۷۳/۵ کیلومتر

در این بخش قصد بر آن است که عملکرد سیستم انتقال را تا فاصله انتقال ۷۳/۵ کیلومتر که در این پژوهش، این فاصله به عنوان طول یک گستره تقویتی انتخاب شده است، مورد ارزیابی و تحلیل قرار دهیم. با توجه به دانش پژوهنده، تا کنون بیشترین فاصله تقویتی با بهینه سازی تقویت کننده‌های نوری نیمه هادی به ۷۰ کیلومتر رسیده است [۲۵]، که در این پژوهش با بهینه سازی صحیح تقویت کننده‌های نوری نیمه هادی توانسته‌ایم فاصله تقویتی سیگنال را افزایش دهیم که این امر سبب آن می‌گردد که بتوان سیگنال را تا فواصل دورتری با تضعیف کمتری انتقال داد. لذا در راستای شبیه سازی سیستم انتقال، با اشاره به [۳] سیستم نشان داده شده در شکل (۴-۱۴) را بکار می‌گیریم.



شکل ۴ - ۱۴ : سیستم ارائه شده برای انتقال سیگنال DWDM با نرخ بیت ۱۰ گیگابیت بر ثانیه

در این سیستم از ۱۰ منبع لیزری لورنتزی موج پیوسته^۱ (CW) به عنوان منابع نوری در محدوده طولی موجی ۱۵۴۹/۸۴ نانومتر تا ۱۵۵۱/۲۸۷ نانومتر استفاده شده است. این محدوده طولی موجی معادل محدوده

فرکانسی ۱۹۳/۲۵۴ تراهرتز تا ۱۹۳/۴۳۴ تراهرتز می‌باشد که می‌توان ۱۰ کانال را با فاصله کانالی ۲۰ گیگاهرتز بین این دو محدوده فرکانسی قرار داد. سیگنالهای خروجی هر یک از این منابع، توسط مدولاتورهای فاز ماخ-زندر^۱ (MZM) از جنس لیتیوم نیوبیت (LiNbO_3) با مدولاسیون کلید زنی تفاضلی شیف فاز با فرمت بازگشت به صفر^۲ (RZ-DPSK) مدوله شده که این سیگنال بوسیله انکد کردن پرتو خروجی منبع نوری لورنتزی موج پیوسته، شکل گرفته است. اطلاعات حاصله که به شکل سیگنالهای PSK تفاضلی با فرمت بازگشت به صفر (RZ-DPSK) و به صورت یک توالی باینری شبه تصادفی^۳ (PRBS) با طول کلمه^۴ $(2^8 - 1)$ در نرخ بیت ۱۰ گیگابیت بر ثانیه می‌باشد، به درون مدولاتور نوری فاز ارسال می‌گردد. پهنای خط^۴ منبع نوری موج پیوسته برابر با ۱ مگاهرتز بوده و پهنای باند ۳ دسی بلی فیلتر پائین گذر بسل برای تولید منبع دیتا با فرمت بازگشت به صفر، روی ۱۰ گیگاهرتز تنظیم شده است. این قسمت از سیستم، در حقیقت همان فرستنده DPSK می‌باشد. لذا سیگنال DPSK تولیدی پس از عبور از این فیلتر، از طریق مالتی پلکسنوری به داخل فیبر که همان محیط انتقال بوده، ارسال می‌گردد. در آن سوی خط، در طرف گیرنده، پس از دی مالتی پلکس شدن سیگنال و تبدیل به ۱۰ کانال مجزا، فرا روی هریک از کانالها یک فیلتر نوری بسل با پهنای باند ۵۰ گیگاهرتز قرار داده شده است تا سیگنال خروجی را بهبود بخشیده و در نهایت پس از عبور از فیلتر، سیگنال نوری به گیرنده DPSK اعمال می‌گردد تا آن را آشکار نموده و به سیگنال الکتریکی اولیه تبدیل نماید. شبیه سازی‌ها توسط نرم افزار مطلب (MATLAB) با بکارگیری مدل شبیه سازی شده تقویت کننده در طول موج مرکزی ۱۵۵۰ نانومتر انجام شده است. بنابراین سیستم نشان داده شده در شکل (۴-۱۵) یک سیستم مخابراتی DWDM است که برای انتقال ۱۰ کانال حاوی اطلاعات با نرخ بیت ۱۰ گیگابیت بر ثانیه و در فاصله کانالی ۲۰ گیگاهرتز با فرمت مدولاسیون RZ-DPSK بین فرستنده و گیرنده DPSK طراحی شده است.

همانطور که پیشتر هم بیان گردید، برای تقویت سیگنال در طول مسیر، از گستره‌های تقویتی شامل چند کیلومتر فیبر تک مد، یک یا چند کیلومتر فیبر جبران کننده پاشندگی و یک تقویت کننده نوری نیمه هادی در انتهای گستره بهره خواهیم جست [۳]. با مطالعه و بررسی پژوهشهای پیشین، در می‌یابیم که حداکثر بهره دریافتی از تقویت کننده نوری نیمه هادی در توان ورودی ۲۰ dBm - کمتر از ۱۶ dB بوده است، لذا حداکثر طول فیبر تک مد مورد استفاده به ۶۰ کیلومتر محدود شده است [۲۵]. بنابراین با توجه به اینکه در این رساله توانسته‌ایم بهره تقویت کننده را تا حد امکان افزایش دهیم، می‌توان فاصله تقویتی را نیز افزایش داد، لذا به نحوی که در ادامه هم بیان خواهد شد، با در نظر گرفتن افت فیبر و همچنین برای افزایش

1 - Mach-Zehnder Modulators (MZM)

2 - Return to Zero Differential Phase Shift Keying (RZ-DPSK)

3 - Pseudo-Random Binary Sequence (PRBS)

4 - Line Width

فاصله انتقال، طول فیبر تک مد را ۶۳ کیلومتر در نظر گرفته که با توجه به رابطه زیر می توان طول فیبر جبران کننده پاشندگی را برای جبران سازی کامل محاسبه نمود [۳]:

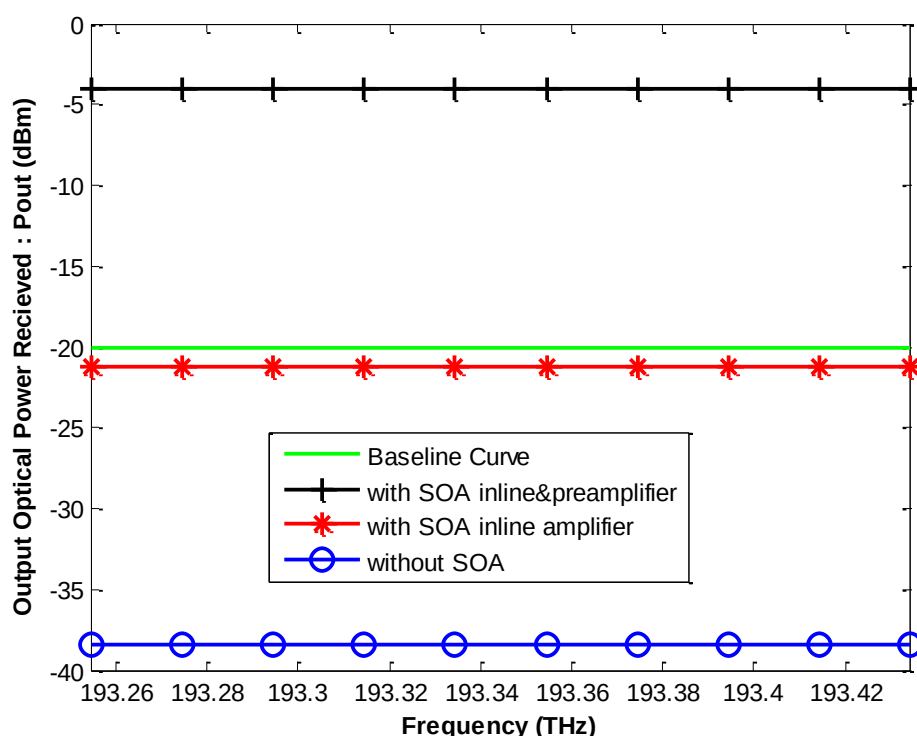
$$L_{DCF} = \frac{-D_1 \cdot L_{SMF}}{D_2} \quad (3-4)$$

در این رابطه، L_{DCF} طول فیبر جبران کننده پاشندگی، L_{SMF} طول فیبر تک مد، D_1 پارامتر پاشندگی فیبر تک مد و D_2 پارامتر پاشندگی فیبر جبران ساز پاشندگی می باشد. مقدار پارامتر پاشندگی برای فیبر تک مد برابر با ۱۶/۷۵ ps/nm-km و برای فیبر جبران ساز پاشندگی برای جبران سازی کامل اثرات غیرخطی برابر با ۱۰۰/۵ ps/nm-km خواهد بود [۳]. با محاسبه رابطه (۳-۴) طول فیبر جبران کننده پاشندگی (DCF) به مقدار ۱۰/۵ کیلومتر بدست می آید. لذا گستره های تقویتی در این سیستم مخابراتی، هر یک ۷۳/۵ کیلومتر بوده که متشکل از ۶۳ کیلومتر فیبر تک مد، ۱۰/۵ کیلومتر فیبر جبران کننده پاشندگی و یک تقویت کننده نوری نیمه هادی در انتها خواهند بود. از طرفی افت فیبر تک مد برابر با ۰/۲ dB/km و افت فیبر جبران کننده پاشندگی برابر با ۰/۵۵ dB/Km می باشد [۳]. لذا برای ارزیابی عملکرد این گستره ۷۳/۵ کیلومتری، مبنای کار را بر استفاده از شکل (۴-۱۴) قرار داده، توان ورودی ۱۰ منبع لورنتزی را در ده میکرو وات تنظیم نموده و آن را تحت سه تست آزمایش می کنیم که نتایج در شکل (۴-۱۵) قابل مشاهده است.

در نخستین گام، مسیر ۷۳/۵ کیلومتری را بدون استفاده از هیچگونه تقویت کننده و فقط با استفاده از فیبر تک مد و فیبر جبران ساز پاشندگی بین گیرنده و فرستنده DPSK مورد ارزیابی قرار داده و مشاهده نمودیم که در انتهای مسیر، همانطور که انتظار می رفت، سیگنال بیش از ۱۸ دسی بل تضعیف گردید (خط با نشانگر O در شکل ۴-۱۵). در گام بعدی یک تقویت کننده نوری نیمه هادی را به عنوان تقویت کننده درون خطی در انتهای مسیر انتقال قرار داده و سیستم دوباره مورد ارزیابی قرار گرفته است و همانطور که در شکل (۴-۱۵) مشاهده می گردد (خط با نشانگر *)، سیگنال تا حد زیادی تقویت گشته و در انتهای مسیر فقط به میزان تقریبی ۱/۲ dB نسبت به توان ارسالی افت داشته است. در نهایت، مسیر ۷۳/۵ کیلومتری را با استفاده از یک تقویت کننده نوری نیمه هادی در انتهای مسیر و یک پیش تقویت کننده، پیش از گیرنده مورد ارزیابی و تحلیل قرار داده و همانطور که مشاهده می گردد، سیگنال تا حد مطلوبی تقریباً به میزان ۱۶ dB تقویت شده است (خط با نشانگر +).

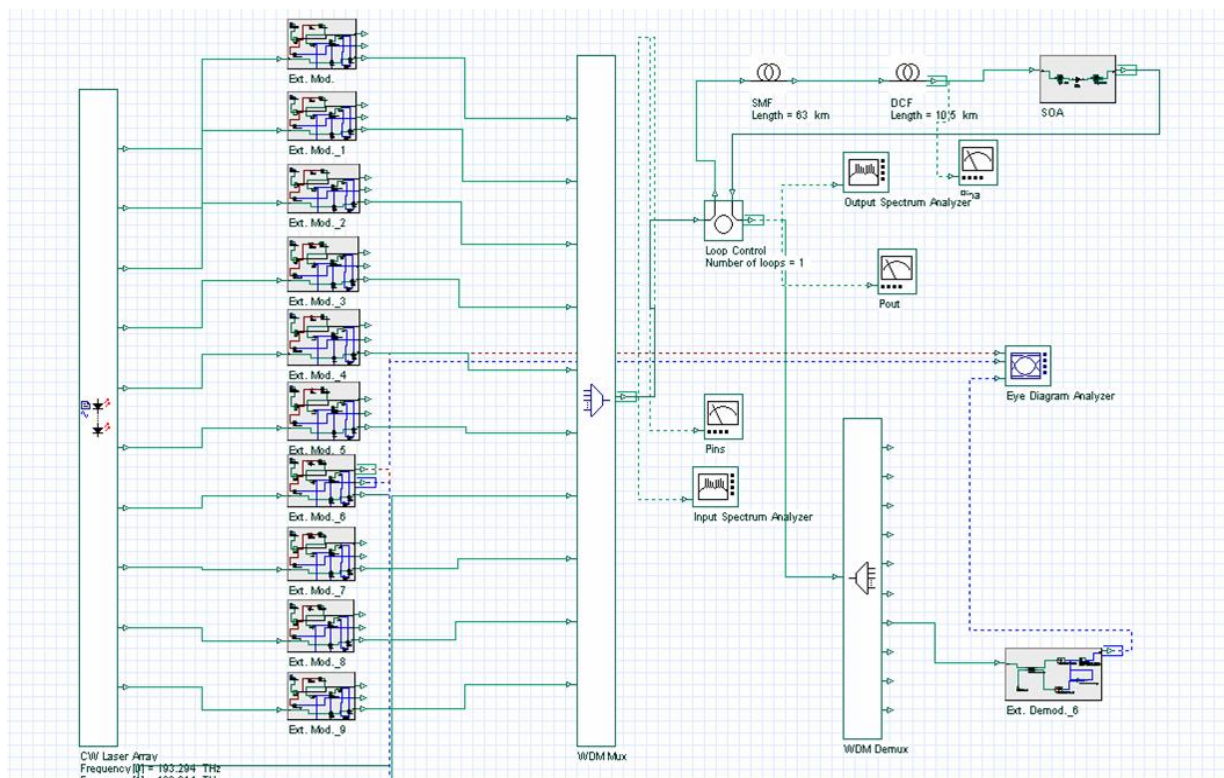
در سویی دیگر، یکی از منحنی های که اطلاعات مفیدی را در ارتباط با انتقال سیگنال در هر سیستم مخابراتی در خود دارد، منحنی دیاگرام چشمی می باشد. این دیاگرام در حقیقت، ابزاری ساده و مرسوم برای مطالعه تاثیرات تداخل، نمونه برداری بین کانالی و دیگر اختلالات کانالی در سیستم های مخابراتی دیجیتال می باشد. برای شکل دهی به دیاگرام چشمی ابتدا می بایست توان دریافتی را به ازای زمان در محورهای با فواصل ثابت رسم نموده، سپس انتهای محور زمانی را به ابتدای آن پیچش داد. نتیجه این عمل، دیاگرامی

ایجاد می‌نماید که شامل تعداد بسیار زیادی منحنی‌های همپوشان خواهد بود. در قسمت بعد، برای مقایسهٔ سیگنال ارسالی و دریافتی پس از فاصلهٔ انتقال ۷۳/۵ کیلومتر، دیاگرام چشمی را برای قبل از فاصلهٔ انتقال و همچنین پس از فاصلهٔ انتقال، با استفاده از نرم افزار Optisystem محاسبه نموده و برای هر سه تست به تصویر کشیده‌ایم.



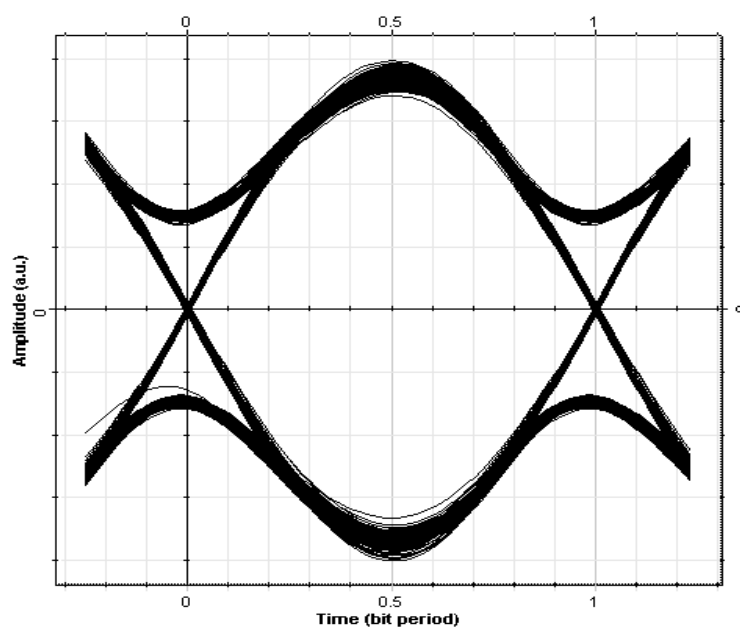
شکل ۴ - ۱۵: توان نوری دریافتی برای کانالهای مختلف تا فاصلهٔ انتقال ۷۳/۵ کیلومتر و توان ورودی -۲۰ dBm برای سه حالت بدون تقویت کننده، با استفاده از تقویت کننده درون خطی و با استفاده از تقویت کننده درون خطی و پیش تقویت کننده در گیرنده

بدین منظور، در شکل (۴-۱۶) سیستم مورد استفاده برای ارزیابی عملکرد گسترهٔ تقویتی ۷۳/۵ کیلومتری و ترسیم دیاگرام چشمی را مشاهده می‌نمائیم. در ورودی این سیستم همانطور که بیان گردید، از ۱۰ لیزر موج پیوسته با توان ورودی -۲۰ dBm در فاصلهٔ کانالی ۲۰ گیگاهرتز استفاده کرده، سپس توسط فرستندهٔ DPSK سیگنال اصلی را که به صورت توالی باینری تصادفی (PRBS) با طول کلمه ۱ - ۲^۸ می‌باشد توسط مدولاتورهای فاز با مدولاسیون DPSK با فرمت بازگشت به صفر (RZ) مدوله کرده تا به رشته بیت های نوری مجزا تقسیم گردند. در مرحلهٔ بعد ۱۰ سیگنال خروجی مدولاتورها را به مالتی پلکسر وارد کرده تا در آنجا به یک رشته بیت نوری واحد تبدیل گشته و جهت ورود به فیبرنوری آماده گردند. پس از عبور سیگنال از فاصلهٔ ۷۳/۵ کیلومتری، سیگنال را توسط دی مالتی پلکسر به ۱۰ کانال مورد نظر تبدیل کرده و سپس توسط گیرندهٔ DPSK آن را آشکار کرده و سیگنال الکتریکی اصلی بازتولید می‌گردد. در نهایت توسط ابزارهای مناسب، پاسخ سیستم را مورد ارزیابی و تحلیل قرار داده‌ایم.



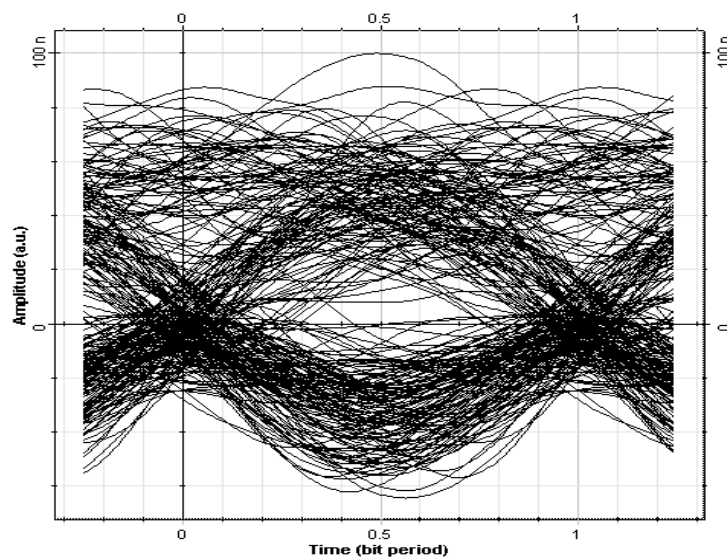
شکل ۴ - ۱۶: سیستم مورد استفاده برای ارزیابی عملکرد سیستم در انتقال سیگنال DWDM توسط نرم افزار Optisystem

در شکل (۴-۱۷) دیاگرام چشمی را قبل از فاصله انتقال $73/5$ کیلومتر برای کانال شماره ۶ (۱۵۵۰ نانومتر) مشاهده می‌نمائیم. همانطور که مشخص است، سیگنال تولیدی نمایانگر یک سیگنال RZ-DPSK با نسبت ۶۶٪ می‌باشد.

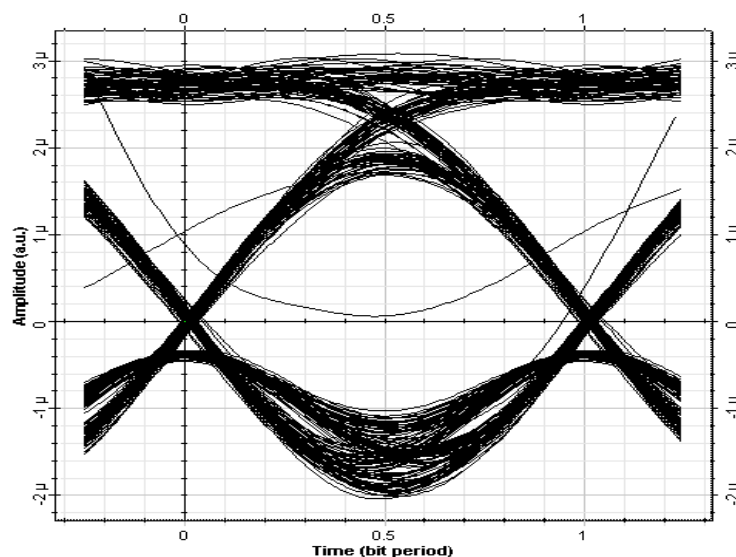


شکل ۴ - ۱۷: دیاگرام چشمی پیش از فاصله انتقال $73/5$ کیلومتری برای کانال شماره ۶

در شکل (۴-۱۸-الف) دیاگرام چشمی را پس از فاصله انتقال $73/5$ کیلومتری بدون استفاده از هیچ تقویت کننده‌ای مشاهده می‌نمائیم. همانطور که بیان شد، سیگنال بیش از ۱۸ دسی بل تضعیف گشته و کیفیت آن نیز کاملاً از دست رفته است. در شکل (۴-۱۸-ب) دیاگرام چشمی را پس از فاصله انتقال $73/5$ کیلومتر و با استفاده از یک تقویت کننده نوری نیمه هادی درون خطی مشاهده می‌نمائیم. همانطور که مشهود است، سیگنال به میزان زیادی تقویت گردیده و دیاگرام چشمی نیز تا حدی بهبود یافته است، ولی باز هم ۲ دسی بل افت توان خواهیم داشت.



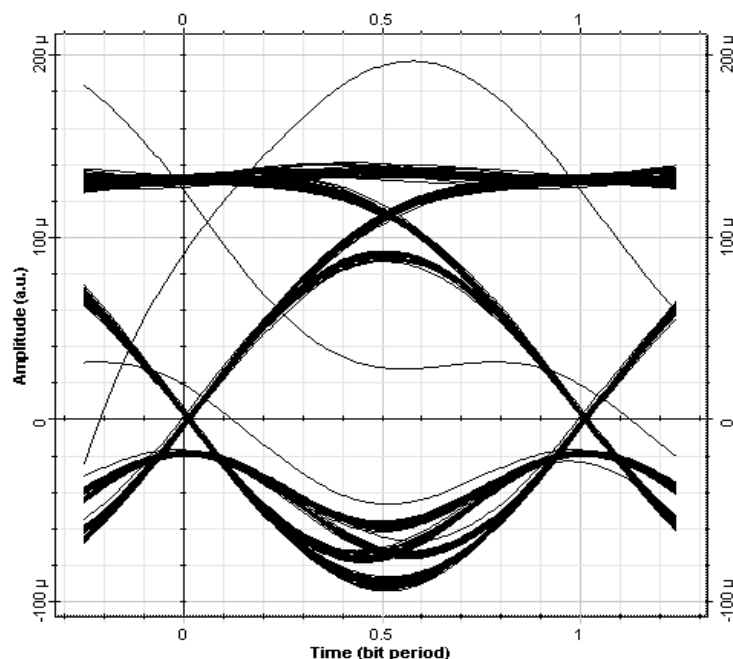
(الف)



(ب)

شکل ۴ - ۱۸ : دیاگرام چشمی پس از فاصله $73/5$ کیلومتری برای کانال شماره ۶
 (الف) بدون استفاده از تقویت کننده و (ب) با استفاده از تقویت کننده درون خطی

در نهایت در شکل (۴-۱۹) دیاگرام چشمی را پس از فاصله انتقال ۷۳/۵ کیلومتری و با استفاده از تقویت کننده درون خطی و پیش تقویت کننده در گیرنده مشاهده می‌نمائیم. همانطور که نمایان است، دیاگرام چشمی به طور قابل ملاحظه‌ای بهبود یافته و کیفیت سیگنال دریافتی بسیار مطلوب گردیده است. لذا با استفاده از یک پیش تقویت کننده می‌توان تا حد زیادی سیگنال ارسالی را بهبود داده و توان آن را بالا برد تا به راحتی توسط گیرنده آشکار گردد.



شکل ۴ - ۱۹: دیاگرام چشمی پس از فاصله انتقال ۷۳/۵ کیلومتر با استفاده از تقویت کننده نوری نیمه هادی درون خطی و پیش تقویت کننده

در این پژوهش با بهینه سازی تقویت کننده‌های نوری نیمه هادی توانسته‌ایم بهره تقویت کننده را تا حدی بهبود بخشیده تا برای استفاده در سیستم مخابرات نوری DWDM با فاصله کانالی ۲۰ گیگاهرتز، ضریب تقویت را افزایش داده و توان نویز انتشاری و تداخل کانالی را کاهش دهد. لذا با استفاده از این مدل ساده ارائه شده همانگونه که نشان داده شد می‌توان فواصل تقویتی را نیز افزایش داد و بنابراین سیگنال را با افت کمتری به فواصل دوربرد انتقال داد. که این امر باعث کاهش هزینه سیستم خواهد شد. نکته حائز اهمیت این است که اگر بخواهیم از همین گستره‌های تقویتی بهینه شده در فواصل کوتاه تر استفاده نمائیم، همانطور که در ادامه نیز بیان خواهد شد، می‌توان تعداد گستره‌های مورد نیاز را در مقایسه با پژوهشهای پیشین [به طور نمونه ۲۵] تا حد زیادی کاهش داد.

در جدول (۴-۴) نتایج حاصل از بکارگیری تقویت کننده نوری نیمه هادی بهینه شده ارائه شده در این پایان نامه در مقایسه با پژوهش سینگ و کالر [۲۵] را در یک گستره تقویتی مشاهده می‌نمائیم. همانطور

که بیان گردید، طول گستره تقویتی در رساله حاضر برابر با ۷۳/۵ کیلومتر و در پژوهش [۲۵] برابر با ۷۰ کیلومتر بوده است. اما همانگونه که در جدول مشاهده می‌نمائیم، نتایج این پایان نامه علیرغم افزایش فاصله انتقال، بهتر از پژوهش مورد بحث می‌باشد.

جدول ۴ - ۴ : مقایسه نتایج حاصل از بکارگیری تقویت کننده نوری نیمه هادی در یک گستره تقویتی

الف) مدل ارائه شده توسط سینگ و کالر [۲۵]

وضعیت گستره	طول گستره	تضعیف فیبر	توان ورودی	توان خروجی
بدون تقویت کننده	۷۰ کیلومتر	-۱۷/۵ dB	-۲۰ dBm	-۳۷/۵ dBm
با تقویت کننده درون خطی	۷۰ کیلومتر	-۱۷/۵ dB	-۲۰ dBm	-۲۱/۲۶ dBm
با تقویت کننده درون خطی و پیش تقویت کننده در گیرنده	۷۰ کیلومتر	-۱۷/۵ dB	-۲۰ dBm	-۵/۰۲ dBm

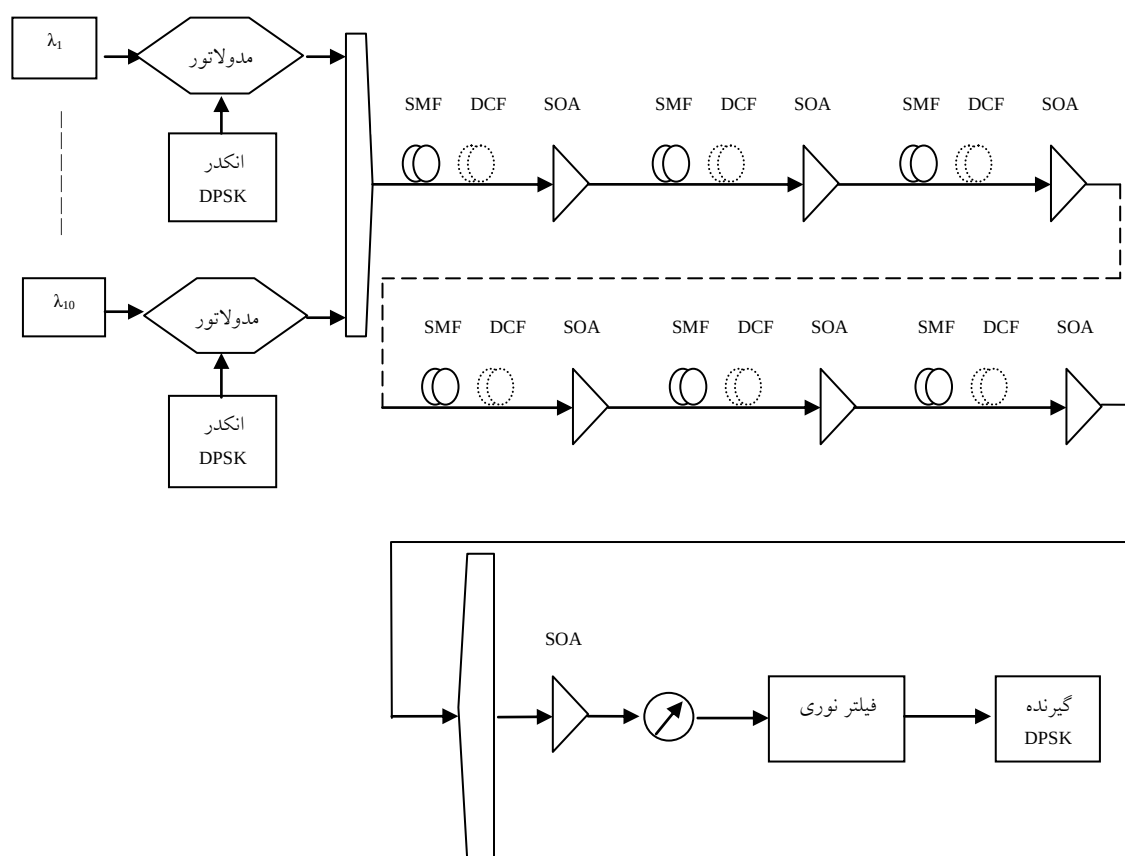
ب) مدل ارائه شده در این رساله

وضعیت گستره	طول گستره	تضعیف فیبر	توان ورودی	توان خروجی
بدون تقویت کننده	۷۳/۵ کیلومتر	-۱۸/۱۸ dB	-۲۰ dBm	-۳۸/۳۸ dBm
با تقویت کننده درون خطی	۷۳/۵ کیلومتر	-۱۸/۱۸ dB	-۲۰ dBm	-۲۱/۲ dBm
با تقویت کننده درون خطی و پیش تقویت کننده در گیرنده	۷۳/۵ کیلومتر	-۱۸/۱۸ dB	-۲۰ dBm	-۴/۰۲۸ dBm

بنابراین، با توجه به مباحث گفته شده و تحلیل نتایج می‌توان دریافت که با استفاده از گستره‌های ۷۳/۵ کیلومتری می‌توان سیگنال را با ضریب تقویت مناسب و نویز اندک به فواصل انتقال طولانی‌تر ارسال نمود و با استفاده از یک تقویت کننده به عنوان پیش تقویت کننده در گیرنده، می‌توان کیفیت و توان سیگنال دریافتی را بهبود بخشید. لذا در ادامه از این گستره‌های تقویتی برای انتقال سیگنال با نرخ بیت ۱۰۰ گیگابیت بر ثانیه (۱۰ کانال DWDM با نرخ بیت ۱۰ گیگابیت بر ثانیه) به فواصل دوربرد (۴۱۹۰ کیلومتر) استفاده کرده، طرح‌های گستره‌ای مورد استفاده برای انتقال سیگنال را معرفی نموده و عملکرد هریک را بررسی خواهیم نمود. در نهایت طرح بهینه‌ای را ارائه خواهیم کرد که نسبت به طرح‌های مشابه عملکردی بهتری از خود نشان دهد و کارایی آن را مورد ارزیابی و تجزیه و تحلیل قرار خواهیم داد.

۴-۶-۲ شبیه سازی، ارزیابی و تحلیل عملکرد سیستم انتقال تا فاصله انتقال ۴۱۹۰ کیلومتر

در این قسمت، عملکرد سیستم مخابراتی DWDM را تا فاصله انتقال ۴۱۹۰ کیلومتر با بکارگیری گستره‌های تقویتی ۷۳/۵ کیلومتری متشکل از ۶۳ کیلومتر فیبر تک مد، ۱۰/۵ کیلومتر فیبر جبران کننده پاشندگی و یک تقویت کننده نوری نیمه هادی در انتهای گستره مورد ارزیابی و تحلیل قرار خواهیم داد. به منظور انتقال سیگنال به فواصل دوربرد از سیستم نشان داده شده در شکل (۴-۲۰) استفاده می‌کنیم.



شکل ۴ - ۲۰: شمای کلی سیستم انتقال ۱۰ کانال DWDM با نرخ بیت ۱۰ گیگابیت بر ثانیه به فواصل انتقال دوربرد

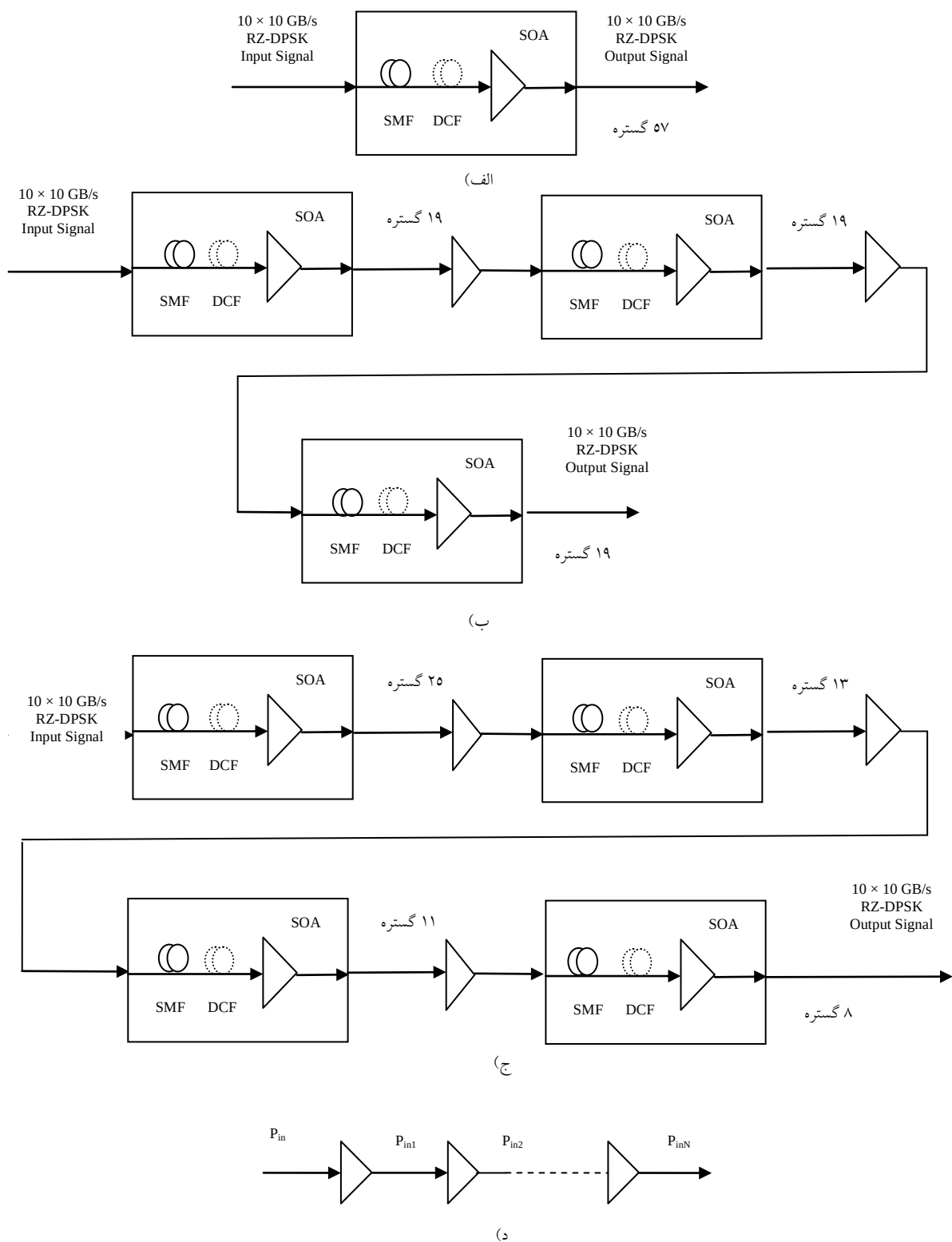
اما در ابتدا ذکر این نکته ضروری است که برای انتقال سیگنال DWDM به فواصل دوربرد نیازمند بکارگیری طرحهای گستره‌ای متشکل از گستره‌های تقویتی و تقویت کننده‌های نوری نیمه هادی بهینه شده خواهیم بود که در جای نیاز از این تقویت کننده‌ها به صورت تقویت کننده‌های متوالی یا چند طبقه پس از چند گستره استفاده خواهیم نمود. تا کنون طرح‌های متنوعی برای انتقال سیگنال DWDM به فواصل دوربرد ارائه شده است که این عموماً به دو دسته تقسیم می‌گردند: طرح گستره‌ای معمولی^۱ و طرح گستره‌ای یکسان^۲ [۲۵].

1 - Conventional Span Scheme
2 - Equal Span Scheme

در طرح گستره‌ای معمولی که ساده‌ترین و ابتدایی‌ترین طرحی است که به ذهن خطور می‌کند، گستره های تقویتی را به صورت متوالی در طول مسیر انتقال بین فرستنده و گیرنده قرار داده و سیستم انتقال را بنا خواهیم نمود. در این چیدمان، سیگنال پس از عبور از چندین کیلومتر فیبر تک مد و فیبر جبران کننده پاشندگی، توسط یک تقویت کننده نوری نیمه هادی تقویت شده و به گستره بعدی انتقال می‌یابد. شمای کلی این طرح در شکل (۴-۲۱-الف) به تصویر کشیده شده است. همانطور که بیان خواهد شد، این طرح از لحاظ کارایی، عملکرد نسبتاً ضعیفی دارد. چرا که سیگنال در طول مسیر انتقال، به شدت تضعیف می‌گردد، لذا نیازمند به کار گیری طرح گستره‌ای دیگری خواهیم بود.

طرح گستره‌ای جایگزینی که تا کنون وجود داشته است، طرح گستره‌ای یکسان نام دارد. شمای کلی این طرح همانند طرح معمولی است، فقط با این تفاوت که به علت افت پیاپی سیگنال در طول مسیر، فاصله انتقال را به چند قسمت مساوی تقسیم کرده و پس از عبور سیگنال از تعداد گستره‌های مساوی، سیگنال ارسالی توسط یک تقویت کننده نوری نیمه هادی متوالی تقویت شده و به گستره بعدی انتقال می‌یابد. این تقویت کننده با تقویت کننده داخلی گستره به مانند یک تقویت کننده چند طبقه عمل کرده که باعث تقویت چندبرابر سیگنال ارسالی خواهد شد. این طرح را می‌توان در شکل (۴-۲۱-ب) مشاهده نمود. طرح گستره ای یکسان برای فواصل انتقال کوتاه بسیار کاربردی تر از طرح معمولی خواهد بود. اما با افزایش فاصله انتقال، همانطور که بیان خواهد شد، این طرح هم عملکرد مناسبی نخواهد داشت. لذا نیازمند بکارگیری طرحی بهینه هستیم که سیگنال را در طول مسیر انتقال، تقویت کرده و همچنین از پویایی لازم برای بکارگیری در فواصل دوربرد نیز برخوردار باشد. طرح فوق الذکر را می‌توان به نام طرح گستره‌ای بهینه^۱ نام گذاری نمود، چرا که همانطور که نشان خواهیم داد، عملکرد بهتری نسبت به دو طرح پیشین داشته و کارایی بهینه تری از خود نشان خواهد داد. این طرح در شکل (۴-۲۱-ج) قابل مشاهده است.

لذا در این قسمت، انتقال سیگنال را تا فاصله ۴۱۹۰ کیلومتر با استفاده از طرح‌های گستره‌ای معمولی و یکسان، مورد تجزیه و تحلیل قرار خواهیم داد و سپس طرح جایگزین را که طرح گستره بهینه نام دارد، به کار گرفته و کارایی آن را نشان خواهیم داد. همانطور که بیان گردید، برای انتقال سیگنال به فواصل دوربرد، از سیستم نشان داده شده در شکل (۴-۲۰) استفاده می‌نمائیم. این سیستم تقریباً همانند سیستم نشان داده شده در شکل (۴-۱۴) می‌باشد، فقط با این تفاوت که در این شکل، ماهیت گستره‌ها نمایان تر است. در شکل (۴-۲۱) نیز سه نوع طرح گستره‌ای مورد استفاده برای انتقال سیگنال DWDM تا فاصله انتقال ۴۱۹۰ کیلومتر نشان داده شده است. همانطور که مشاهده می‌شود، در این شکل برای سادگی کار، فقط کانال مخابراتی نشان داده شده و از به تصویر کشیدن فرستنده و گیرنده خودداری شده است.



شکل ۴ - ۲۱: شمای طرحهای مورد استفاده برای انتقال سیگنال DWDM به فواصل دوربرد
 (الف) طرح گستره معمولی برای فاصله انتقال ۴۱۹۰ کیلومتر، (ب) طرح گستره یکسان،
 (ج) طرح گستره بهینه و (د) شمای معادل طرح گستره معمولی

همانگونه که در شکل (۴-۲۱-الف) مشاهده می‌نمائیم، برای انتقال سیگنال تا فاصله ۴۱۹۰ کیلومتر نیازمند استفاده از ۵۷ گستره ۷۳/۵ کیلومتری در طول مسیر انتقال خواهیم بود. همانطور که بیان گردید، در صورت بکارگیری طرح گستره معمولی، این ۵۷ گستره را به طور متوالی در مسیر انتقال گذاشته تا کل مسیر پوشش داده شود. سپس شبیه سازی برای انتقال ۱۰ کانال DWDM با نرخ بیت ۱۰ گیگابیت بر ثانیه در فاصله کانالی ۲۰ گیگاهرتز و با توان ورودی ۲۰ dBm - بین فرستنده و گیرنده DPSK انجام گرفته و سیستم مورد ارزیابی و تحلیل قرار گرفته است.

در شکل (۴-۲۱-ب) شماتیک طرح گستره یکسان نشان داده شده است. همانطور که بیان شد، بدلیل عدم کارایی طرح گستره معمولی، در این طرح، پس از عبور و تقویت سیگنال از ۱۹ گستره، آن را دوباره توسط یک تقویت کننده نوری نیمه هادی متوالی که همراه با تقویت کننده نوری نیمه هادی واقع شده درون گستره، یک تقویت کننده دو طبقه را شکل می‌دهند، تقویت نموده و به گستره بعدی انتقال می‌دهیم. با استفاده از این ترفند، سیگنال در میانه مسیر انتقال دوباره تقویت شده و در پایان مسیر، با تقویت بهتر و کیفیت مطلوب‌تری دریافت می‌گردد.

در شکل (۴-۲۱-ج) طرح گستره بهینه را مشاهده می‌نمائیم. در این طرح، به جای استفاده از چیدمان یکسان، با جایگذاری متفاوت گستره‌ها در طول مسیر انتقال، به صورت ۲۵، ۱۳، ۱۱ و ۸ گستره، توان بهتری دریافت خواهیم نمود. همانطور که در ادامه نیز بیان می‌گردد، به روش سعی و خطا و با چندین چیدمان متفاوت، پژوهنده طرح جایگزین فوق را برای انتقال سیگنال برگزیده است.

در طرح گستره معمولی، به دلیل تضعیف پیاپی سیگنال در طول مسیر انتقال، توان دریافتی به شدت افت می‌نماید. بنابراین، برای انتقال سیگنال به فواصل دوربرد، حتی با تقویت سیگنال توسط تقویت کننده های نوری نیمه هادی بازهم شاهد افت مداوم توان دریافتی نسبت به توان اعمالی خواهیم بود. لذا همانطور که در شکل (۴-۲۱-د) مشاهده می‌نمائیم، برای فواصل طولانی، خواهیم داشت:

$$P_{in1} < P_{in} \quad (۴-۴)$$

$$P_{in} < P_s \quad (۵-۴)$$

$$P_{inN} < P_{ini} < P_{in2} < P_{in1} < P_{in} < P_s \quad (۶-۴)$$

که P_{ini} توان ورودی گستره i ام، P_s توان اشباع ورودی و P_{in} توان ورودی سیستم می‌باشد. از رابطه بالا در می‌یابیم که توان ورودی تقویت کننده به تدریج رو به کاهش می‌گذارد و این امر سبب آن می‌گردد که افت توان بسیار زیادی در مسیر انتقال ایجاد گردد، به نحوی که حتی با تقویت سیگنال توسط تقویت کننده های نوری نیمه هادی در انتهای هر گستره، این میزان تقویت، جوابگوی افت شدید سیگنال در طول مسیر نخواهد بود. لذا طرح گستره معمولی برای تقویت و ارسال سیگنال به فواصل طولانی مناسب نمی‌باشد. البته

نکته اساسی این است، که در این طرح به علت افت پیایی سیگنال در طول مسیر، اعوجاجات ناشی از افزایش توان نیز کاهش یافته و توان نویز انتشاری خودبخودی (P_{ASE}) نیز همانطور که در شکل (۳-۴) مشاهده نمودیم، به شدت کاهش خواهد یافت. اما تلفات توان شدیدی در فواصل انتقال طولانی تر رخ خواهد داد. در اینجا تلفات توان را عموماً به عنوان پناستی توان^۱ می‌شناسیم. که این کمیت نشان دهنده میزان کاهش یا افزایش توان دریافتی در انتهای مسیر نسبت به توان ارسالی خواهد بود. حال این کمیت می‌تواند مثبت یا منفی باشد، که هر دوی این حالات مطلوب نیست، چرا که در ابتدای مسیر اگر سیگنالی را با توان خاصی ارسال می‌نمائیم، در آن سوی خط نیز مطلوبست که سیگنال اطلاعات را با همین توان، نه کمتر و نه بیشتر دریافت نمائیم. لذا با توجه به شبیه سازی انجام شده، همانطور که در شکل (۴-۲۲) مشاهده می‌نمائیم (خط دارای علامت --)، پاور پناستی شدیدی به میزان ۷۲/۳۹ dB- در توان دریافتی بوجود می‌آید که به هیچ وجه مطلوب نخواهد بود.

در مقابل، طرح گستره یکسان، برای انتقال سیگنال به فواصل طولانی تر کارایی بهتری نسبت به طرح معمولی دارد. در این طرح همانطور که در شکل (۴-۲۱ب) نشان داده شده است، سیگنال پس از عبور از ۱۹ گستره، دوباره تقویت شده و به گستره بعدی انتقال می‌یابد. اما در این طرح به علت یکسان بودن تعداد گستره‌ها نویز انتشاری به شدت افزایش خواهد یافت. اما همچنان در این طرح خواهیم داشت:

$$P_{inN} < P_{in} < P_s \quad (۴-۷)$$

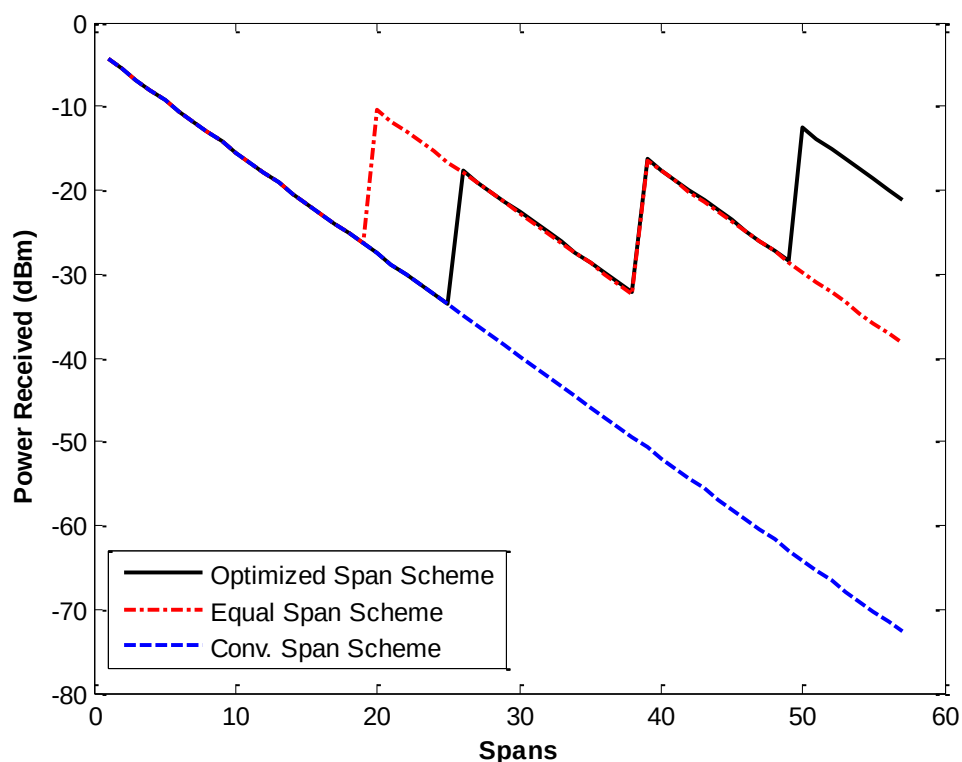
لذا در این طرح، همانطور که در شکل (۴-۲۲) مشاهده می‌نمائیم (خط دارای علامت -)، بازهم توان دریافتی، به مراتب کمتر از توان ارسالی است و پاور پناستی با اینکه به شدت کم شده است، اما هنوز هم به مقدار ۳۸/۲۲ dB- است، که برای این سیستم انتقال، مقدار نسبتاً زیادی است.

لذا می‌بایست طرحی را ارائه نمود که بتواند این افت شدید توان را در سیستم انتقال جبران نموده و عملکرد بهینه‌ای را نسبت به دو طرح پیشین ارائه کند. در چنین طرحی می‌بایست توان ورودی هر یک از تقویت کننده‌های نوری نیمه هادی را چه درون گستره‌ها و چه خارج گستره، در حد کمتر از توان اشباع نگه داشت تا تقویت کننده در حالت خطی عمل نماید و سیگنال با توان و کیفیت مطلوبی پس از تقویت کننده، دریافت شود. چنین طرحی را می‌توان، طرح گستره بهینه نامید. بنابراین در طرح گستره بهینه، در ابتدا می‌بایست تعداد گستره‌های بیشتری نسبت به طرح گستره یکسان انتخاب نمود. لذا پس از انجام چندین مرحله سعی و خطا و مشاهده نتیجه، به این ترکیب برای چینش گستره‌ها در طول مسیر انتقال رسیده‌ایم:

در ابتدا به جای اینکه پس از ۱۹ گستره، عمل تقویت صورت پذیرد، می‌توان آن را به پس از ۲۵ گستره انتقال داد و سپس از آنجا که در طرح گستره یکسان، پس از ۳۸ گستره، عمل تقویت دوباره صورت

می‌پذیرد، لذا حاصل دو گستره اول در طرح بهینه هم می‌بایست ۳۸ باشد. بنابراین تعداد گستره‌های بعدی ۱۳ خواهد بود. تفاوت اصلی میان گستره بهینه و یکسان، بعد از ۳۸ گستره اتفاق می‌افتد. چرا که در این مرحله، ۱۹ گستره باقی مانده را به دو قسمت تقسیم کرده که یکی ۱۱ گستره و دیگری ۸ خواهد بود که این امر سبب آن خواهد شد که سیگنال در انتهای مسیر دوباره تقویت گردد. بنابراین، ترکیب چینش گستره‌ها که باعث بهینه شدن عملکرد سیستم شده، عبارتست از: ۲۵، ۱۳، ۱۱ و ۸ گستره. همانطور که در شکل (۴-۲۲) مشاهده می‌نمائیم (خط توپر)، این ترکیب، به شدت باعث افزایش توان ارسالی خواهد شد.

برای ارزیابی توان دریافتی پس از فاصله انتقال ۴۱۹۰ کیلومتر، شبیه سازی برای هر سه طرح، بین فرستنده و گیرنده DPSK برای سیستم نشان داده شده در شکل (۴-۲۱) انجام شده است. در شکل (۴-۲۲) توان دریافتی به ازای هر گستره، تا فاصله انتقال ۴۱۹۰ کیلومتر برای هر یک از طرح‌های گستره‌ای معمولی، یکسان و بهینه محاسبه و ترسیم شده است. همانگونه که مشاهده می‌شود با افزایش تعداد گستره‌ها توان دریافتی نیز کاهش می‌یابد. اما با تقویت سیگنال در گستره بهینه، توان بهتری نسبت به دو طرح دیگر، در انتهای مسیر دریافت می‌شود.



شکل ۴ - ۲۲: توان دریافتی به ازای تعداد گستره‌ها، برای طرح‌های گستره‌ای معمولی، یکسان و بهینه تا فاصله انتقال ۴۱۹۰ کیلومتر

با توجه به آنچه بیان شد، در طرح گستره بهینه خواهیم داشت:

$$P_{inN} \geq P_s > P_{in} \quad (۴-۸)$$

که P_{inN} توان ورودی گستره N ام است. که این امر می‌تواند نشان دهنده عملکرد بهتر طرح گستره بهینه باشد. همانطور که بیان گردید، در طرح گستره یکسان، به علت همسان بودن گستره‌های تقویتی و افزایش تعداد تقویت کننده‌های نوری نیمه هادی، نویز انتشاری به شدت در سیستم انتقال تجمیع شده و لذا توان نویز انتشاری خودبخودی طرح معمولی از توان نویز انتشاری خودبخودی طرح یکسان کمتر بوده و نویز انتشاری طرح بهینه، بین این دو مقدار قرار دارد، بنابراین:

$$P_{ASE\ conv.} < P_{ASE\ opt.} < P_{ASE\ eq.} \quad (9-4)$$

که $P_{ASE\ conv.}$ ، $P_{ASE\ opt.}$ و $P_{ASE\ eq.}$ به ترتیب، توانهای نویز انتشاری خودبخودی در طرحهای گستره‌ای معمولی، بهینه و یکسان خواهد بود. همانطور که مشخص است، در طرح گستره معمولی به علت اینکه تعداد تقویت کننده‌های نوری نیمه هادی، کمتر از طرح‌های یکسان و بهینه است، لذا توان نویز انتشاری نیز به شدت اندک خواهد بود. نکته مهمی که در طرح گستره بهینه وجود دارد این است که پاور پنالتی به شدت کاهش یافته و به مقدار $-1/0.2$ dB خواهد رسید. لذا پنالتی توان برای سه طرح به شرح زیر خواهد بود:

$$P_{opt.} < P_{eq.} < P_{conv.} \quad (10-4)$$

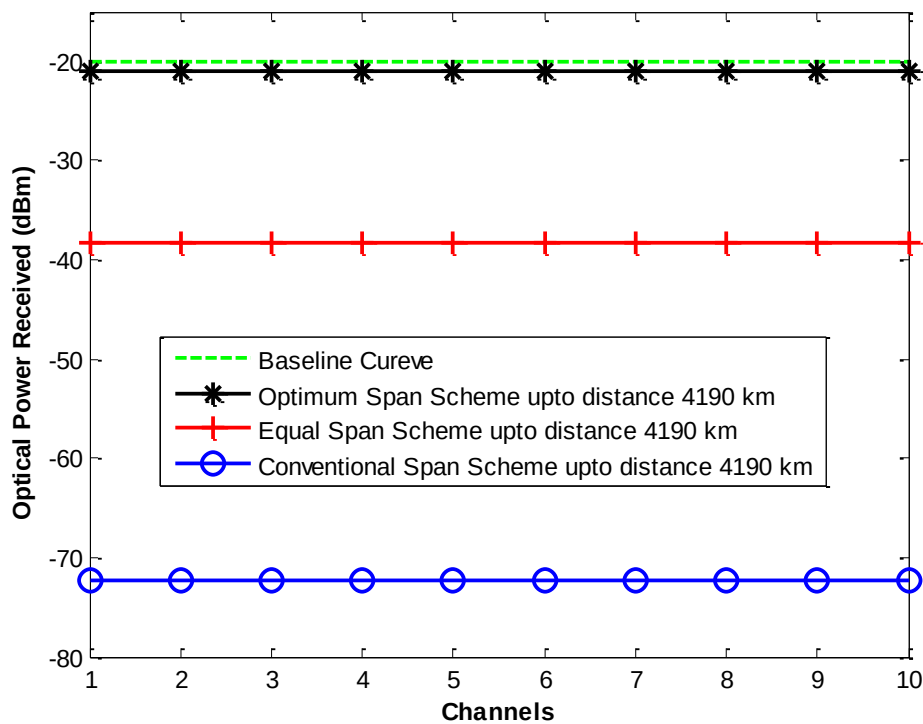
که در این رابطه، $P_{opt.}$ ، $P_{eq.}$ و $P_{conv.}$ به ترتیب پنالتی توان برای طرحهای گستره‌ای بهینه، یکسان و معمولی می‌باشند. در جدول (4-5) به طور مقایسه‌ای خصوصیات طرحهای گستره‌ای معمولی، یکسان و متداول نشان داده شده است.

جدول ۴ - ۵ : مقایسه اجمالی طرحهای گستره‌ای مورد استفاده تا فاصله انتقال ۴۱۹۰ کیلومتر با توان ورودی ۲۰ dBm -

پارامتر	طرح گستره معمولی	طرح گستره یکسان	طرح گستره بهینه
تعداد تقویت کننده	۵۷	۶۰	۵۹
حداقل توان بر کانال (dBm)	- ۷۲/۳۹	- ۳۸/۲۲	- ۲۱/۰۲
پنالتی توان (dB)	- ۵۲/۳۹	- ۱۸/۲۲	- ۱/۰۲

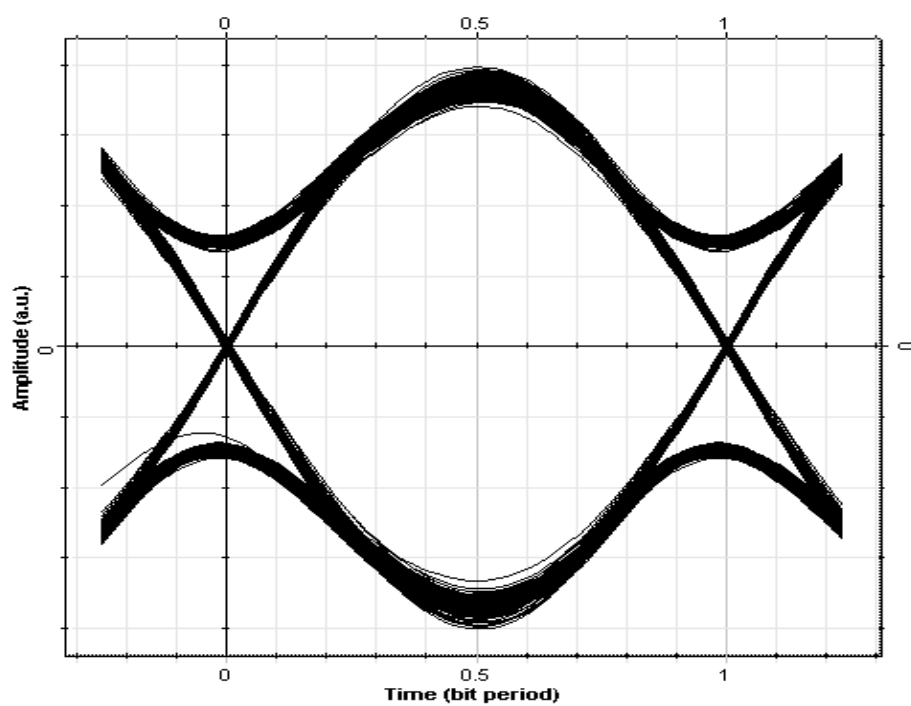
در شکل (4-۲۳) تغییرات توان نوری به ازای کانالهای مختلف، برای طرحهای گستره‌ای معمولی، یکسان و بهینه ترسیم شده است. همانطور که مشاهده می‌گردد، تغییرات توان به ازای تعداد کانالها تقریباً ثابت بوده و با بکارگیری طرح گستره بهینه شده، توان دریافتی پس از فاصله انتقال ۴۱۹۰ کیلومتر، به میزان $-21/0.2$ dBm خواهد رسید. لذا با مقایسه نتایج این رساله با نوشتارهای پیشین [۱۲، ۲۵ و ۳۰] به وضوح مشخص است که با بکارگیری مدل ارائه شده به نتایج مطلوبتری برای انتقال ۱۰ کانال DWDM با نرخ بیت

۱۰ گیگابیت بر ثانیه در فاصله کانالی ۲۰ گیگاهرتز، دست خواهیم یافت. چرا که با بهینه سازی تقویت کننده و افزایش طول گستره‌های تقویتی، می‌توان در یک فاصله یکسان، تعداد گستره‌ها را کاهش داد. همچنین با تغییر نحوه چیدمان گستره‌ها در طول مسیر انتقال، قادر به انتقال سیگنال با کیفیت مطلوب، نویز اندک و توان بالا خواهیم بود.

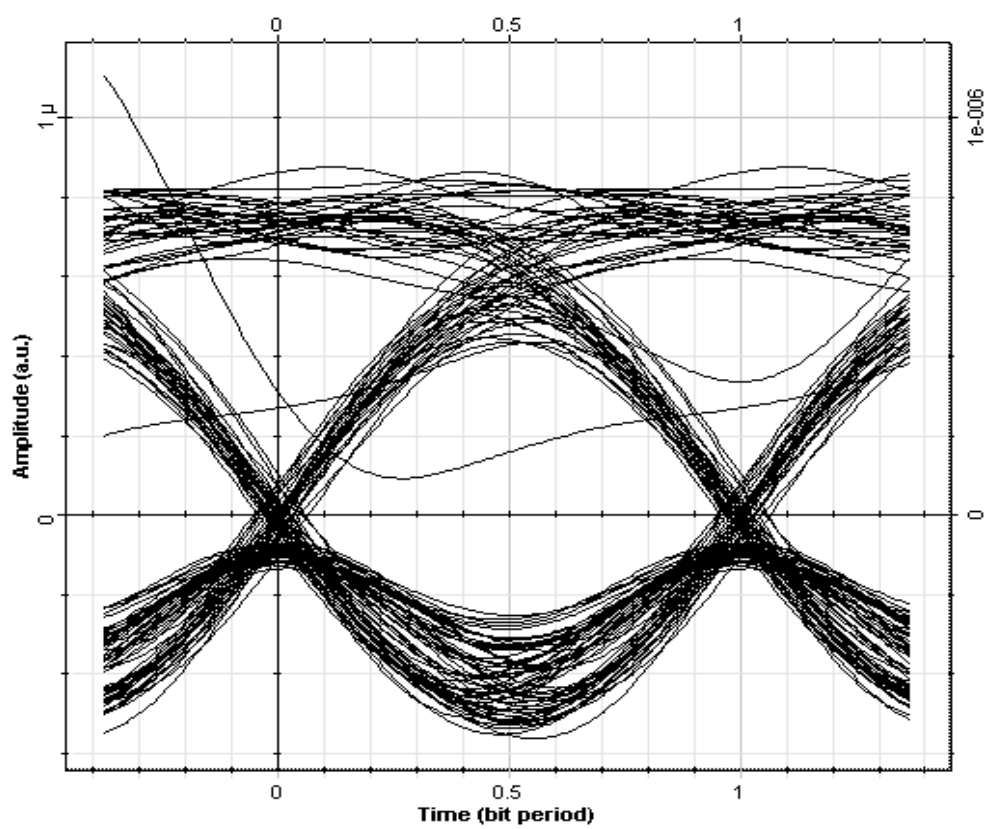


شکل ۴ - ۲۳: توان نوری دریافتی به ازای تعداد کانالها برای طرحهای گستره‌ای متفاوت تا فاصله انتقال ۴۱۹۰ کیلومتر

در مرحله بعد، دیاگرام چشمی را برای قبل و بعد از فاصله انتقال ۴۱۹۰ کیلومتر با بکارگیری طرح گستره بهینه، و با استفاده از سیستم مشابه با آنچه در شکل (۴-۱۶) نشان داده شده، فقط با این تفاوت که فاصله انتقال به جای ۷۳/۵ کیلومتر، به ۴۱۹۰ کیلومتر افزایش یافته، محاسبه کرده و در شکل (۴-۲۴) مشاهده خواهیم نمود. شکل (۴-۲۴-الف) نشان دهنده سیگنال DPSK ورودی برای کانال شماره ۶ (۱۵۵۰ نانومتر) می‌باشد. همانگونه که نمایان است، سیگنال به شکل DPSK با نسبت ۶۶ درصد مدوله شده و از کیفیت مطلوبی برخوردار است. در شکل (۴-۲۴-ب) دیاگرام چشمی را پس از فاصله انتقال ۴۱۹۰ کیلومتر و با بکارگیری طرح بهینه و همچنین بهینه سازی تقویت کننده‌های نوری نیمه هادی مشاهده می‌نمائیم. همانطور که از شکل هم نمایان است، با اینکه اعوجاجاتی در سیگنال بوجود آمده است، ولی بازهم از کیفیت خوبی برخوردار بوده و هنوز ماهیت DPSK خودش را حفظ نموده است.



(الف)

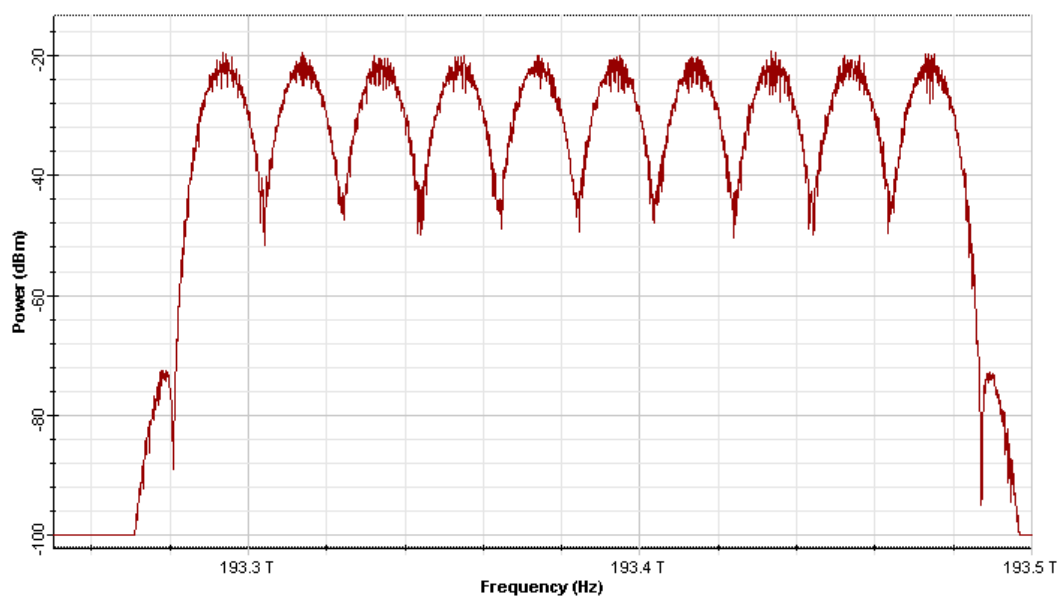


(ب)

شکل ۴ - ۲۴ : دیاگرام چشمی برای فاصله انتقال ۴۱۹۰ کیلومتر. الف) قبل از فاصله انتقال و ب) پس از فاصله انتقال.

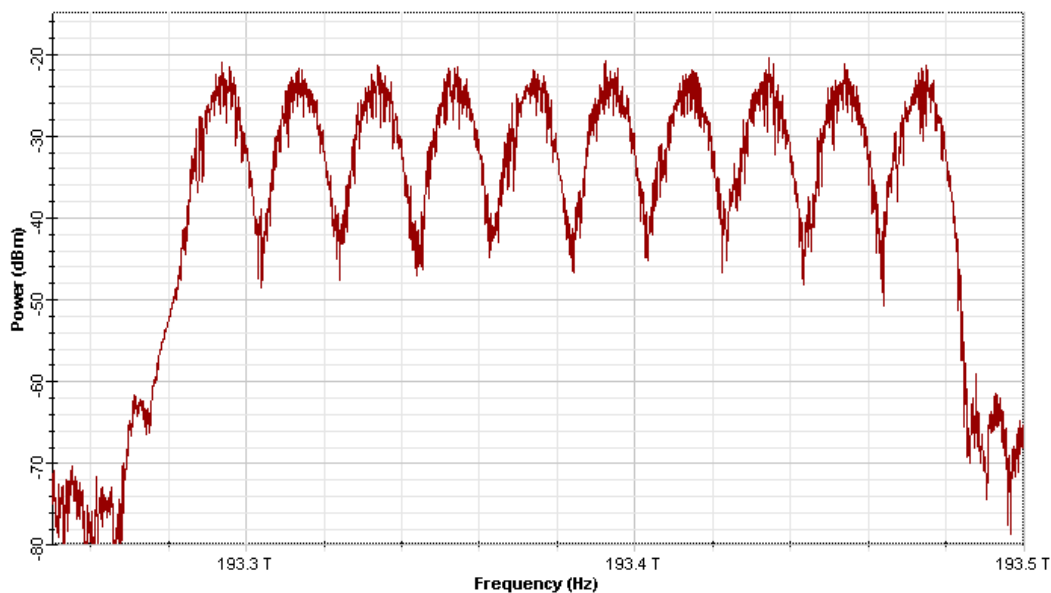
در شکل (۴-۲۵) طیف توان نوری را برای قبل و بعد از فاصله انتقال ۴۱۹۰ کیلومتر با بکارگیری طرح گستره بهینه و تقویت کننده‌های نوری نیمه هادی بهینه شده مشاهده می‌نمائیم. همانطور که نمایان است، طرح گستره بهینه عملکرد بسیار مناسبی خواهد داشت.

Input Spectrum Analyzer



(الف)

Output Spectrum Analyzer



(ب)

شکل ۴ - ۲۵ : طیف توان نوری برای فاصله انتقال ۴۱۹۰ کیلومتر

الف) قبل از فاصله انتقال در خروجی مالتی پلکسر و ب) پس از فاصله انتقال پس از پیش تقویت کننده

بنابراین در این فصل ابتدا با شناخت پارامترهای ساختاری تقویت کننده‌های نوری نیمه هادی، مدلی ساده را در حالت استاتیک برای شبیه سازی عملکرد تقویت کننده در برخورد با سیگنال نوری ارائه کرده و سپس با استفاده از این مدل، توانستیم عملکرد تقویت کننده را تا حد امکان بهینه نماییم. مشخصه‌های اصلی تقویت کننده که تحت بهینه سازی قرار گرفتند، عبارتند از: افزایش ضریب تقویت، کاهش توان نویز انتشاری تقویت کننده، افزایش و هموار سازی بهره نوری و کاهش تداخل کانالی. سپس این مدل بهینه شده را در سیستم انتقال ده کانال DWDM با نرخ بیت ۱۰ گیگابیت بر ثانیه و با بکارگیری تقویت کننده‌های نوری نیمه هادی (SOA) بهینه شده چند طبقه در گستره‌های تقویتی بهینه شده، با فرمت مدولاسیون RZ-DPSK، در فاصله کانالی ۲۰ گیگاهرتز مورد تحلیل و شبیه سازی قرار دادیم. در ابتدا نشان دادیم که با استفاده از تقویت کننده‌های نوری نیمه هادی بهینه شده در گستره‌های تقویتی در فاصله انتقال ۷۳/۵ کیلومتری در مقایسه با حالت بدون تقویت کننده، توان و کیفیت مطلوبی دریافت نموده که با استفاده از یک پیش تقویت کننده می‌توان این توان را بهبود بخشید. در نهایت نشان داده شد که با استفاده از طرح گستره بهینه، می‌توان سیگنال DWDM را با نرخ بیت ۱۰۰ گیگابیت بر ثانیه و با فرمت مدولاسیون RZ-DPSK تا فاصله انتقال ۴۱۹۰ کیلومتر با ضریب توان دریافتی ۲۱/۱۴ dBm و افت توان ۱/۰۲ dB انتقال داد. این نتایج به صورت خلاصه در جدول (۴-۶) بیان شده است.

جدول ۴ - ۶: نتایج حاصل از شبیه سازی و بکارگیری تقویت کننده در سیستم مخابراتی DWDM

با توان ورودی ۲۰ dBm و فاصله کانالی ۲۰ GHz

مقدار کمیت	مشخصه
۱۷/۰۵ dB	ضریب تقویت
۲۲۳ μ W	توان نویز انتشاری
-۱۶/۲ dB	تداخل کانالی
-۳۸/۳۸ dBm	توان خروجی گستره ۷۳/۵ کیلومتری بدون تقویت کننده
-۲۱/۲ dBm	توان خروجی گستره ۷۳/۵ کیلومتری با بکارگیری تقویت کننده درون خطی
-۴/۰۳ dBm	توان خروجی گستره ۷۳/۵ کیلومتری با بکارگیری تقویت کننده درون خطی و پیش تقویت کننده در گیرنده
-۷۲/۳۹ dBm	توان خروجی طرح گستره معمولی پس از ۴۱۹۰ کیلومتر
-۳۸/۲۲ dBm	توان خروجی طرح گستره یکسان پس از ۴۱۹۰ کیلومتر
-۲۱ dBm	توان خروجی طرح گستره بهینه پس از ۴۱۹۰ کیلومتر

فصل پنجم: بحث، تفسیر، نتیجه‌گیری و جمع‌بندی

۵-۱ مقدمه

پژوهش‌های اخیر در توسعه سیستم‌های مخابرات نوری، در راستای افزایش ظرفیت کلی محیط انتقال و طراحی سیستم‌های انتقال نوری دوربرد صورت پذیرفته است. این اهداف، تنها با استفاده از روش مالتی پلکس با تقسیم طول موج (WDM) قابل دستیابی است. این روش در مقایسه با روش‌های قبلی مانند مالتی پلکس با تقسیم زمانی (TDM) برای بهره‌گیری بیشتر از پهنای باند فیبرنوری ارائه شده است. در روش WDM با قرار دادن هر کانال در طول موج‌های متفاوت، چندین کانال را از طریق یک فیبر انتقال می‌دهیم. این امر همچنین سبب می‌شود که از القای تداخل بین کانالی در فرآیند مالتی پلکس یا دی مالتی پلکس کردن سیگنال در فیبرنوری جلوگیری شود. سیستم WDM با فراهم ساختن بستری برای انتقال همزمان سیگنال‌های مستقل در یک فیبر، باعث بکارگیری قسمت قابل توجهی از پهنای باند قابل دسترس می‌شود.

در راستای برآورده کردن نیازهای روز افزون برای سیستم‌هایی با ظرفیت انتقال چندین ترا بیت بر ثانیه، سیستم مالتی پلکس با تقسیم فشرده طول موج (DWDM)، بر پایه سرعت انتقال ۴۰ گیگابیت بر ثانیه، به عنوان نسل بعدی سیستم‌های با ظرفیت انتقال بالا معرفی شده است. البته مشکلات زیادی نظیر پاشندگی طول موج، پاشندگی مُد قطبش، اثرات غیرخطی خط انتقال، تداخل خطی و غیر خطی کانال مجاور و افزایش هزینه کنترل سیگنال، فرا روی این سیستم جدید قرار دارد که می‌بایست در راستای مرتفع نمودن هریک از این مشکلات، قدمی برداشت.

با وجود اینکه در فیبرهای نوری افت ذاتی کمی وجود دارد، با این حال، بسیار ضروری است که برای بالا نگه داشتن نسبت سیگنال به نویز و همچنین آشکارسازی سیگنال با نرخ خطای کم در گیرنده، سیگنال نوری را در طول مسیر تقویت نمائیم. همچنین در سیستم‌های انتقال دوربرد، نیازمند تقویت و بازتولید سیگنال در طول مسیر هستیم. علاوه بر این، با افزایش پهنای باند، لازم است از ادواتی برای تقویت نور در طول مسیر استفاده شود که مستقل از نرخ بیت و انکدینگ سیستم باشند.

برای تقویت سیگنال در طول مسیر، دو روش وجود دارد: در روش نخست که با استفاده از تکرار کننده‌های اپتوالکترونیکی انجام می‌گیرد، در فواصل مشخص، سیگنال نوری را به جریان الکتریکی تبدیل کرده، سپس توسط ادوات الکترونیکی، این جریان را تقویت نموده و در نهایت، سیگنال تقویت شده را توسط فرستنده دوباره به نور تبدیل نموده و به داخل فیبر ارسال می‌کنیم. این روش که تقویت و بازتولید نام دارد، در سیستم‌های نوری WDM هم باعث اتلاف توان و پائین آمدن سرعت سیستم و هم باعث افزایش هزینه می‌گردد. پس در این سیستم‌ها نیازمند بکارگیری روش دوم، یعنی استفاده از تقویت کننده‌های نوری می‌باشیم. لذا پیشرفتهای اخیر در مخابرات نوری، تا حد زیادی وابسته به توسعه تقویت کننده‌های نوری پر

قدرت و پربازده می‌باشد، که ضرورت تبدیلات پرهزینه سیگنال‌های نوری به الکتریکی و الکتریکی به نوری را از بین برده و نور را در طول مسیر، مستقیماً تقویت نمایند.

همانطور که پیشتر هم بیان گردید؛ در سیستم‌های مخابراتی امروزی، تقویت کننده‌های نوری سه کاربرد اساسی دارند:

الف) تقویت توان، پس از خروج نور از منابع لیزری

ب) فراهم سازی بازتولیدهای نوری و تقویت درون خطی در سیستم‌های مخابراتی دوربرد

ج) استفاده به عنوان پیش تقویت کننده، پیش از گیرنده.

در همین راستا، عمدتاً دو نوع تقویت کننده نوری داریم:

۱- تقویت کننده‌های فیبرنوری (FOA) که به سه دسته تقسیم می‌شوند:

الف) تقویت کننده‌های ساخته شده توسط عناصر آلیاگر کمیاب که از طریق آلیش هسته

فیبر با یونهای کمیاب نظیر نئودیمیم، پراسئودینیوم و اربیوم ساخته می‌شوند،

ب) تقویت کننده‌های رامان

ج) تقویت کننده‌های بریلوئن. که این دو تقویت کننده، برای تقویت سیگنال به ترتیب مبتنی بر

اثرات غیر خطی پراکندگی رامان تحریک شده (SRS) و پراکندگی بریلوئن تحریک شده (SBS)

در فیبر شیشه‌ای می‌باشند.

۲- تقویت کننده‌های نوری نیمه هادی (SOA):

این تقویت کننده‌ها تا حد زیادی مشابه لیزرهای نیمه هادی هستند. همانطور که می‌دانیم، لیزرهای نیمه هادی دارای محیط بهره و مکانیزم فیدبک نوری هستند که این فیدبک عموماً توسط سطوح برش داده شده جلویی لیزر و یا شبکه بندی مناسب در نزدیکی محیط بهره، ایجاد می‌شود. از این رو، تقویت کننده های نوری نیمه هادی، اصولاً نوعی لیزر هستند که سیستم فیدبک را از آن حذف نموده و فقط دارای محیط بهره می‌باشند. بعلاوه، تمام سیستم‌های لیزری تا زمانی که به اشباع نرسیده‌اند به عنوان تقویت کننده عمل می‌کنند، لذا لیزرهای نیمه هادی نیز از این قاعده مستثنی نیستند. تقویت کننده‌های نوری نیمه هادی به دو دسته تقسیم می‌شوند:

الف) تقویت کننده‌های نوری نیمه هادی فابری پروت (FP): این نوع تقویت کننده‌ها دارای بازتابی

در حدود 0.3 (تقریباً کمتر از دیود لیزری)، در سطوح جلویی هستند و به علت داشتن پهنای باند

باریک (در حد 5 تا 10 گیگاهرتز) و داشتن خواص غیرخطی در محیط بهره و فیدبک اندک از

سطوح جلویی، در کاربردهای پردازش نوری سیگنال نظیر تبدیل طول موج و سوئیچینگ نوری مورد

استفاده قرار می‌گیرند.

ب) تقویت کننده‌های نوری نیمه هادی موج رونده (TW): این نوع تقویت کننده‌ها را با متوقف ساختن مسیر فیدبک انعکاسی از سطوح جلویی لیزر توسط یک لایه پوششی ضد بازتابش تولید می‌کنند. باید در نظر داشت که شدت بازتابش باید به اندازه کافی کاهش یابد تا تقویت کننده به صورت موج رونده عمل نماید (در حد 10^{-3} تا 10^{-4}). علت نام گذاری موج رونده این است که سیگنال تقویت شده فقط در راستای مستقیم در داخل محیط تقویت، حرکت می‌کند. این نوع تقویت کننده‌ها به علت داشتن پهنای باند وسیع (در حد ۳ تراهرتز)، برای کاربردهای WDM بسیار مناسب هستند.

از مبحث تقویت کننده‌ها که گذر کنیم، موضوع قابل بحث، انتقال سیگنال DWDM به فواصل دوربرد خواهد بود. بنابراین، تا کنون طرح‌های متنوع و گوناگونی برای انتقال سیگنال‌های DWDM به فواصل دوربرد، ارائه شده و پژوهش‌های فراوانی نیز در این زمینه صورت گرفته است. مبحث اصلی همه این طرح‌ها و پژوهش‌ها دو موضوع عمده است، یکی چگونگی انتقال سیگنال و دیگری ادوات مورد نیاز برای تقویت سیگنال در طول مسیر.

همانطور که بیان گردید، برای انتقال سیگنال‌های DWDM نیازمند آن هستیم که طرح گستره‌ای را ارائه کنیم تا کار انتقال و تقویت سیگنال را انجام دهد. این طرح‌ها عموماً شامل چند کیلومتر فیبر تک مد، چند کیلومتر فیبر جبران کننده پاشندگی برای جبران اثرات غیرخطی فیبرنوری در سیستم انتقال و ترکیبی از تقویت کننده‌های نوری نیمه هادی برای تقویت سیگنال می‌باشند که به هر کدام از این مجموعه‌ها یک گستره گفته می‌شود. لذا تحلیل و بررسی رفتار تقویت کننده‌های نوری نیمه‌هادی، در سیستم‌های مخابراتی DWDM دوربرد، از اهمیت بالایی برخوردار است. گستره‌های مورد بحث برای انتقال سیگنال DWDM به فواصل دوربرد، عبارتند از:

الف) طرح گستره معمولی: در این طرح، گستره‌های تقویتی را به صورت متوالی در سیستم انتقال جایگذاری کرده و سیگنال مورد نظر را از طریق این کانال مخابراتی انتقال می‌دهیم.

ب) طرح گستره یکسان: در این طرح، به علت عدم کارایی طرح گستره معمولی برای فواصل طولانی‌تر، فاصله انتقال را به چند قسمت مساوی تقسیم کرده و پس از هر یک از این فواصل مساوی که هر کدام نیز شامل چندین گستره می‌باشد، یک تقویت کننده نوری نیمه هادی قرار داده تا سیگنال را تقویت نماید.

ج) طرح گستره بهینه: در این طرح با تغییر نحوه چیدمان گستره‌ها در طول مسیر به جای چیدمان یکسان، کارایی سیستم را بالا برده، توان انتقالی را افزایش داده و عملکرد سیستم مخابراتی را بهبود می‌بخشیم.

۵-۲ چکیده‌ای از روند پژوهش حاضر و بیان کیفی نتایج

در فصل اول، مقدمه و کلیاتی از موضوع ارائه گردید و ضرورت تحقیق و اهداف پژوهش به طور خلاصه و تیتروار بیان شد. سپس در فصل دوم مبانی ریاضی و پیشینه و سابقه پژوهش به تفصیل مورد بررسی قرار گرفته و بیان شد که در پژوهشهایی که پژوهنده بررسی نموده، چه مواردی مد نظر بوده و نتایج آنها به اختصار چه بوده است. مبانی ریاضی که به تفصیل در فصل دوم ارائه و تحلیل شد، در حقیقت اصول عملکرد تقویت کننده‌های نوری و به خصوص تقویت کننده‌های نوری نیمه هادی بوده است که در پژوهشهای پیشین، به طور وافر مورد استفاده قرار گرفته است. علاوه بر این، یکی از پژوهشهایی که در این رساله به طور جدی مورد بحث و تحلیل واقع شد، پژوهش انجام شده توسط سینگ و کالر [۲۵] بوده که مبنای کار پژوهنده قرار گرفته است. در انتهای فصل دوم نیز دلایل گزینش این حوزه پژوهش به نحوی که به اختصار در ابتدای این فصل نیز بیان گردید، معرفی شد.

سپس در فصل سوم، با جمع بندی مطالب ارائه شده در فصل اول و دوم، اصول و مبانی بکار رفته در این رساله و نحوه انجام شبیه سازیها و بهینه سازی تقویت کننده و سیستم به صورت تئوری بیان گردید و در صورت لزوم بر روی روابط ریاضی مورد نیاز، بحث و تفسیر کافی ارائه شد. سپس سیستمهای مورد استفاده برای شبیه سازی مشخصه‌های تقویت کننده نظیر ضریب تقویت، توان نویز انتشاری و کراس تاک نیز معرفی گردید. یکی از مواردی که به تفصیل در این فصل مورد بررسی قرار گرفت، نحوه انجام شبیه سازیها و همچنین پارامترهای مورد نیاز برای شبیه سازیها و نحوه انجام بهینه سازی بوده است. سرانجام در فصل چهارم مباحثی را که به صورت تئوری یا با شکل و تفسیر در فصل سوم بیان گردیده بود، با انجام شبیه سازی و مدل سازی تقویت کننده تکمیل نمودیم.

در فصل چهارم، ابتدا با شناخت پارامترهای ساختاری تقویت کننده‌های نوری نیمه هادی، مدلی ساده را با استفاده از روش تفاضل محدود و بکارگیری نرم افزار مطلب (MATLAB) در حالت استاتیک برای شبیه سازی عملکرد تقویت کننده در برخورد با سیگنال نوری ارائه کرده و سپس با استفاده از این مدل، توانستیم عملکرد تقویت کننده را تا حد امکان بهینه نماییم. بدین منظور، می‌بایست پارامترهای متعددی را تغییر داد تا به مقدار بهینه و قابل قبولی برای مشخصه‌های اصلی تقویت کننده دست یابیم. لذا همانطور که بیان گردید، برخی از پارامترهای ساختاری را مستقیماً از پژوهش تجربی [۱۲] استخراج کرده و بر روی مابقی پارامترهای قابل تغییر، یعنی؛ طول تقویت کننده، جریان بایاس، عرض محیط فعال، ضخامت لایه فعال و ضریب تحدید نوری، تغییراتی ایجاد نموده و به نتایج زیر دست یافته‌ایم. در ابتدا می‌بایست پارامترهای مورد استفاده در تقویت کننده را معرفی نمود. بدین منظور در جدول (۵-۱) پارامترهای مورد استفاده در شبیه سازی تقویت کننده و بکارگیری آن در سیستم مخابراتی بیان گردیده است.

جدول ۵ - ۱: پارامترهای ساختاری تقویت کننده نوری نیمه هادی مورد استفاده در این رساله

نماد	پارامتر	مقدار و واحد
I	جریان بایاس بهینه تقویت کننده	۴۰۰ میلی آمپر
L	طول بهینه تقویت کننده	۶۵۰ میکرومتر
w	پهنای لایه فعال	۳ میکرومتر
d	ضخامت بهینه لایه فعال	۰/۲ میکرومتر
Γ	ضریب تحدید نوری بهینه	۰/۳
N_t	چگالی حامل در گذار	$1/1 \times 10^{18} \text{ cm}^{-3}$
α_g	بهره تفاضلی	$2/5 \times 10^{-16} \text{ cm}^2$
B_o	پهنای باند نوری	۴۰ نانومتر
α_p	تلفات ماده	30 cm^{-1}
A_{nr}	ضریب بازترکیب غیر تشعشی ناشی از تله ها	$5 \times 10^8 \text{ s}^{-1}$
B_{rad}	ضریب بازترکیب تشعشی	$5 \times 10^{-10} \text{ cm}^3/\text{s}$
C_{aug}	ضریب بازترکیب اوژه	$1 \times 10^{-28} \text{ cm}^6/\text{s}$

در جریان بایاس بهینه ۴۰۰ میلی آمپر، طول بهینه ۶۵۰ میکرومتر، ضخامت بهینه لایه فعال به میزان ۰/۲ میکرومتر، ضریب تحدید نوری ۰/۳ و عرض محیط فعال به میزان ۳ میکرومتر، مشخصه‌های اصلی تقویت کننده تحت بهینه سازی قرار گرفتند که عبارتند از: افزایش ضریب تقویت در توان ورودی ۲۰ dBm- تا حد ۱۷/۰۵ dB، کاهش توان نویز انتشاری تقویت کننده که ماکزیمم آن در توان ورودی ۲۰ dBm- به ۲۲۳ میکرو وات رسید، افزایش و هموار سازی بهره نوری تا ۴۰/۵ دسی بل و کاهش تداخل کانالی تا ۱۶/۲- دسی بل که مقادیر حاصله برای مشخصه‌های اصلی تقویت کننده تا حد زیادی نتایج پژوهشهای پیشین را بهبود بخشیده‌اند. در جدول (۵-۲) نتایج حاصل از شبیه سازی تقویت کننده در مقایسه با پژوهش انجام شده توسط سینگ و کالر [۲۵] ارائه شده است. همانطور نمایان است، مدل ارائه شده در این رساله، به مراتب عملکرد بهتری نسبت به مدل قبلی دارد.

جدول ۵ - ۲: مقایسه نتایج حاصل از شبیه سازی عملکرد تقویت کننده نوری نیمه هادی ارائه شده در این رساله و پژوهش سینگ و کالر [۲۵]

مشخصه	مدل ارائه شده توسط سینگ و کالر [۲۵]	مدل ارائه شده در این رساله
نوع تقویت کننده	TWA از جنس InGaAlAs	TWA از جنس GaInAsP
توان ورودی مورد نظر	-۲۰ dBm	-۲۰ dBm
تعداد کانالها	۱۰ کانال	۱۰ کانال
نرخ بیت	۱۰ GB/s	۱۰ GB/s
فاصله کانالی	۲۰ GHz	۲۰ GHz
ضریب تقویت (G)	۱۶ dB	۱۷/۰۵ dB
توان نویز انتشاری خودبخودی (P_{ASE})	۲۲۷ μ w	۲۲۳ μ w
بهره نوری تقویت کننده (g)	۳۶/۵ dB	۴۰/۵ dB
تداخل کانالی (Cross Talk)	-۱۴/۱ dB	-۱۶/۲ dB
توان اشباع ورودی (P_s)	۲۱/۳۶ mW	۲۲ mW

در مرحله بعد، این مدل بهینه شده را در سیستم انتقال ده کانال DWDM با نرخ بیت ۱۰ گیگابیت بر ثانیه و با بکارگیری تقویت کننده های نوری نیمه هادی (SOA) بهینه شده چند طبقه در گستره های تقویتی بهینه شده، با فرمت مدولاسیون RZ-DPSK، در فاصله کانالی ۲۰ گیگاهرتز مورد تحلیل و شبیه سازی قرار داده ایم. برای انتقال سیگنال، همانطور که بیان شد، از گستره های تقویتی استفاده نموده ایم. که گزینش همین گستره ها نیز کار بس دشواری خواهد بود. لذا پس از چندین بار سعی و خطا و همچنین مطالعه پژوهشهای پیشین، گستره ای را برگزیدیم که در هیچ پژوهشی مورد استفاده قرار نگرفته باشد.

بدین منظور از ۶۳ کیلومتر فیبر تک مد (SMF)، ۱۰/۵ کیلومتر فیبر جبران کننده پاشندگی (DCF) و یک تقویت کننده نوری نیمه هادی بهینه شده در انتهای گستره بهره برده ایم. لذا گستره مورد نظر، به طول ۷۳/۵ کیلومتر خواهد بود. با انجام سه آزمایش بر روی این گستره تقویتی، عملکرد و کارایی آن را به اثبات رساندیم. در حالت بدون تقویت کننده، سیگنال ورودی با توان -۲۰ dBm پس از گذر از ۷۳/۵ کیلومتر فیبر تک مد به میزان بیش از ۱۸ دسی بل تضعیف می گردد. با بکارگیری تقویت کننده درون خطی بهینه شده ارائه شده در گستره تقویتی ۷۳/۵ کیلومتری، می توان در همین شرایط، سیگنال را به میزان زیادی تقویت نمود. لذا سیگنال دریافتی پس از ۷۳/۵ کیلومتر فقط حدود ۱ دسی بل از توان ارسالی کمتر بود. نهایتاً با استفاده از یک تقویت کننده درون خطی بهینه شده و یک تقویت کننده به عنوان پیش تقویت کننده در

گیرنده، می‌توان سیگنال ارسالی را بیش از ۱۵ دسی بل تقویت نمود. لذا در فاصله انتقال ۷۳/۵ کیلومتری با بکارگیری تقویت کننده‌های نوری نیمه هادی درون خطی بهینه شده و پیش تقویت کننده، در مقایسه با حالت بدون تقویت کننده، توان و کیفیت مطلوبی دریافت می‌نمائیم. همانطور که در جدول (۳-۵) هم نشان داده شده است مدل ارائه شده در این رساله، به مراتب عملکرد بهتری نسبت به مدل قبلی در گستره تقویتی طولانی تر خواهد داشت.

جدول ۵ - ۳ : مقایسه نتایج حاصل از بکارگیری تقویت کننده نوری نیمه هادی بهینه شده در یک گستره تقویتی

مشخصه	مدل ارائه شده توسط [۲۵]	مدل ارائه شده در این رساله
توان ورودی	-۲۰ dBm	-۲۰ dBm
طول فیبر تک مد	۶۰ کیلومتر	۶۳ کیلومتر
طول فیبر جبران کننده پاشندگی	۱۰ کیلومتر	۱۰/۵ کیلومتر
طول گستره	۷۰ کیلومتر	۷۳/۵ کیلومتر
تضعیف مسیر (گستره)	-۱۷/۵ dB	-۱۸/۱۸ dB
توان خروجی بدون تقویت کننده	-۳۷/۵ dBm	-۳۸/۳۸ dBm
توان خروجی با تقویت کننده درون خطی	-۲۱/۲۶ dBm	-۲۱/۲ dBm
توان خروجی با تقویت کننده درون خطی و پیش تقویت کننده	-۵/۰۲ dBm	-۴/۰۲۸ dBm

در نهایت با بکارگیری تقویت کننده‌های نوری نیمه هادی بهینه شده در گستره‌های تقویتی در سیستم انتقال ۱۰ کانال DWDM با نرخ بیت ۱۰ گیگابیت بر ثانیه در فاصله کانالی ۲۰ گیگاهرتز و تا فاصله انتقال ۴۱۹۰ کیلومتر، سیستم را مورد شبیه سازی و ارزیابی قرار داده‌ایم. نتایج نشان می‌دهد که با استفاده از گستره‌های معمولی و بکارگیری ۵۷ گستره ۷۳/۵ کیلومتری، سیگنال بیش از ۵۲ دسی بل تضعیف می‌گردد. در مقابل، با استفاده از طرح گستره یکسان و بکارگیری همین ۵۷ گستره ولی با تقویت سیگنال پس از هر ۱۹ گستره می‌توان توان سیگنال دریافتی را تا حد زیادی بهبود بخشید که توان دریافتی سیستم، پس از ۴۱۹۰ کیلومتر، کمتر از -۳۸ dBm خواهد بود که باز هم افت توان بسیار زیادی است. در نهایت نشان دادیم که با استفاده از طرح گستره بهینه، می‌توان سیگنال DWDM با نرخ بیت ۱۰۰ گیگابیت بر ثانیه و با فرمت مدولاسیون RZ-DPSK را تا فاصله انتقال ۴۱۹۰ کیلومتر با توان دریافتی مطلوب -۲۱/۱۴ dBm و افت توان

۱/۰۲ dB - انتقال داد. در جدول (۵-۴) خلاصه‌ای از نتایج شبیه سازی های انجام شده برای سیستم مخابراتی DWDM بیان گردیده است.

جدول ۵ - ۴ : نتایج حاصل از شبیه سازی سیستم مخابراتی DWDM

مقدار کمیت	مشخصه
-۲۰ dBm	توان ورودی سیستم
۱۰ کانال	تعداد کانالها
۲۰ GHz	فاصله کانلی
-۴/۰۳ dBm	توان خروجی گستره ۷۳/۵ کیلومتری با بکارگیری تقویت کننده درون خطی و پیش تقویت کننده در گیرنده
-۷۲/۳۹ dBm	توان خروجی طرح گستره معمولی پس از ۴۱۹۰ کیلومتر
-۳۸/۳۳ dBm	توان خروجی طرح گستره یکسان پس از ۴۱۹۰ کیلومتر
-۲۱/۱۴ dBm	توان خروجی طرح گستره بهینه پس از ۴۱۹۰ کیلومتر

1. Agrawal G.P, 1992, "Fiber Optic Communication Systems," John Wiley & Sons, Singapore.
2. Agrawal G.P, 2001, "Applications of Nonlinear Fiber Optics," Academic Press, San Diego, CA.
3. Agrawal G.P, 2002, "Fiber-Optic Communication System," John Wiley Publisher, Singapore, pp. 06-08, 226-239 and 306-307.
4. Agrawal G.P. and Dutta N.K, 1993, "Semiconductor Laser," 2nd edition, Van Nostrand Reinhold, New York.
5. Agrawal G.P, Olsson N.A, November 1989, "Self-Phase Modulation and Spectral Broadening of Optical Pulses in Semiconductor Laser Amplifiers," IEEE Journal on selected topics in Quantum Electronics, Vol. 25, No.2, pp. 2297-2306.
6. Choi W, Hur S, Lee J, Kim Y, and Jeong J, Aug. 2002, "Transmission Performance Analysis of 8 ×10 Gb/s WDM Signals using Cascaded SOAs due to Signal Wavelength Displacement," IEEE Journal Lightwave Technology, vol. 20, pp. 1350-1356.
7. Connelly M.J, March 2001, "Wideband Semiconductor Optical Amplifier Steady-State numerical Model," IEEE Journal of Quantum Electronics, Vol. 37, No. 3, pp. 439-447.
8. Connelly M.J, 2002, "Semiconductor Optical amplifiers," Kluwer Academic Publishers.
9. Duta N.K & Wang Q, "Semiconductor Optical Amplifiers," World Scientific Publishing Co. Pte. Ltd., 2006
10. El Aziz A.A, Ng W.P, Ghassemlooy Z, Aly M.H, 2008, "Optimization of the Key SOA Parameters for Amplification and Switching," PGNet, 978-1-902560-19-9.
11. Pincem E, Audouin O, Dany B. and Wabnitz S., May 2001. "Stability of Synchronous Intensity Modulation Control of 40 Gb/s Dispersion Managed Soliton Transmission," IEEE Journal of Lightwave Technology, vol. 19, no. 5, pp 624-635.
12. Girardin F, Guekos G, Houbavlis A, 1998, "Gain recovery of bulk semiconductor optical amplifiers," IEEE Photonic Technology Letters, Vol. 10, No. 6, pp. 784-786.
13. Ghafouri Shiraz H, 2004, "The Principles Of Semiconductor Laser Diodes and Amplifiers," Imperial College Press

14. Jennen J, De Waardt H, and Acket G, Aug 2001, "Modeling and Performance Analysis of WDM Transmission Links Employing Semiconductor Optical Amplifiers," IEEE Journal of Lightwave Technology, Vol. 19, pp. 1116-1124.
15. Joergensen C, Danielsen S.L, Stubkjaer K.E, Schilling Daub K, Doussiere P, Pommerau F, Hansen P.B, Poulsen H.N, Kloch A, Vaa M, Mikkelsen B, Lach E, Laube F, Idler W, Wunstel L, 1997, "All-optical wavelength conversion at bit rates above 10 Gb/s using semiconductor optical amplifiers," Journal of Selected Topic in Quantum Electronics, Vol. 3, No. 5, pp. 1168–1180.
16. Kim H.K, Chandrasekhar S, Srivastava A, Burrus C.A, and Buhl L, 2001, "10 Gb/s Based WDM Signal Transmission over 500 km of NZDSF using Semiconductor Optical Amplifier as the In-line Amplifier," Electronic Letters, Vol. 37, No. 3, pp.185-187.
17. Koestner C.J. and Snitzer E.A, 1964, "Amplification in a Fiber Laser," Journal of Applied Optics, Vol. 3, pp. 1182-1187.
18. Li Z, Yi D, Mo J, Wang Y. and Lu C, July 2004, " 1050-km WDM Transmission of 8×10.709 Gb/s DPSK Signal using Cascaded In-line Semiconductor Optical Amplifier," IEEE Photonics Technology Letters, Vol. 16, No. 7, pp. 1685-1687.
19. Mynbaev D.H. and Scheiner L.L, 2004, "Fiber-optic communications technology," Pearson Education, 4th Ed., pp. 546-547.
20. Olsson N.A and Ziel J.P. Vander, Jan 1987, "Characteristics of Semiconductor Laser Pumped Brillouin Amplifier with Electronically Controlled Bandwidth," IEEE Journal of LightWave Technology, Vol. Lt-5, No.1, pp. 147-153.
21. Olsson N.A, 1989, "Light Wave Systems with Optical Amplifiers," IEEE Journal of Lightwave Technology, Vol. 7, pp. 1071-1082.
22. Onishchukov G, Lokhnygin V, Shipulin A, and Golles M, 1999, "Differential Binary Phase Shift Keying Transmission using Cascaded Semiconductor Optical Amplifier," Proceedings of CLEO/Pacific Rim'99, Vol. 2, pp. 513-514.
23. Payne D.N, Mears R.J, Reekie L. and Jauncey I.M, 1987, "Low-noise Erbium-Doped Fiber Amplifier at 1.54 μm ," Electron Letters, Vol. 23, pp. 1026-1028.
24. Senior J.M, 1992, "Optical Fiber Communications", Prentice-Hall International, Inc, London.
25. Singh S, Kaler R.S, 2007, "Simulation of DWDM signals using optimum span scheme with cascaded optimized Semiconductor Optical Amplifiers," Elsevier Journal of Optik, Vol. 118, pp. 74-82.
26. Spiekman L.H, Wiesenfeld J.M, Gnauck A.H, Garrett L.D, Hoven G.N, Van de Dongen T, Van Sander-Jochem M.J.H, and Binsma J.J.M, June 2000, "Transmission

- of 8 DWDM Channels at 20 Gb/s over 160 km of SMF using a Cascade of SOA,” IEEE Photonics Technology Letters, Vol. 12, pp. 717-719.
27. Sun Y, Srivastava A.K, Banerjee S, and Sulhoff J.W, 1999, “Error-free Transmission of 32×2.5 Gb/s DWDM Channels over 125 km using Cascaded Inline Semiconductor Optical Amplifiers,” Electronic Letters, Vol. 35, pp.1863-1865.
 28. Xu C, Liu X, Mollenauer L. F, and Wei X, April 2003, “Comparison of return-to-zero differential phase-shift keying and on-off keying in long-haul dispersion managed transmission,” IEEE Photonics Technology Letters, Vol. 15, pp. 617-619.
 29. Xu Shuangmei and Khurgin J. B, Feb. 2004, “A Dispersion Management Scheme for Reducing SOA Induced Crosstalk in WDM links,” IEEE Journal of Light-wave Technology, Vol. 22, No. 2, pp. 417-422.
 30. Yamatoya T, Koyama F, May 2003, “Optical preamplifier using optical modulation of amplified spontaneous emission in saturated semiconductor optical amplifier,” Journal of Lightwave Technology, Vol. 22, No. 5, pp. 1290–1295.
 31. Yarive A, 1989, “Quantum Electronics,” 3rd Edition, John Wiley and sons, pp. 155-182, 232-264.

Abstract

Simulation and Analysis the Transmitting of DWDM Signals Employing Cascaded Optimized Semiconductor Optical Amplifiers

Nowadays in order to increase the total capacity of the communication systems and reduce the complexity and total cost of the long-haul Optical communication systems, the wavelength division multiplexing (WDM) technique has been used instead of the older ones such as time division multiplexing (TMD). In this method we can transmit multiple channels via the same fiber by dividing the transmitted signal into several wavelengths.

On the other hand, in all of the long-haul optical communications systems we should periodically amplify the signal due to the continues losses in the transmission links. Thus we have to employ efficient and powerful optical amplifiers to amplify the signal without any conversions to the electrical domain, which would increase the system efficiency and decrease the total cost of the system. The semiconductor optical amplifiers (SOAs) have attracted much attention as they are cost effective as compared to fiber amplifiers for long haul optical communication systems. The semiconductor optical amplifiers (SOAs) due to their wide gain spectrum, low power consumption, ease of integration with other devices and low cost have become a key element in the field of the optical communication systems.

So this thesis is mainly concerned with the use of semiconductor optical amplifiers (SOAs) in multichannel dense wavelength division multiplexing (DWDM) optical communication systems. Thus in order to utilize the SOAs for long haul WDM transmission links, the structural optimization is performed by developing the SOA model based on the analysis for multichannel DWDM system. Therefore it is essential to optimize the structural parameters of SOA in order to increase the amplification factor and reduce the amplified spontaneous emission (ASE) noise power. So first by measuring the behavior of the semiconductor optical amplifiers in the optical communication system, a simple numerical model has been proposed to simulate the performance of the amplifier. Then by analyzing this model, the amplifier is optimized and the key features of the amplifier such as the gain and the ASE power have been improved. Finally by employing this model as inline amplifier for DWDM transmission links by RZ-DPSK modulation format at 20 GHz channel spacing, the performance of the transmission of 10 channels with bit rate 10 Gb/s has been simulated.

In order to amplify the signal in the transmission link, we have used 73.5 km relay spans consist of 63 km single mode fiber (SMF), 10.5 km dispersion compensating fiber (DCF) and a SOA at the end. So first we have measured the behavior of this 73.5 km span and then the transmission distance goes further and by using these spans in combination with cascaded semiconductor optical amplifiers known as optimized span scheme, the performance of 4190 km transmission distance has been simulated and measured. Thus here it's shown that by optimizing the semiconductor optical amplifiers and employing optimized span achemes we can transmit the signal toward 4190 km by good received power as -21.14 dBm. So the results show that by optimizing the structural parameters of the semiconductor optical amplifiers (SOAs) such as the bias current and the input power of the amplifier and furthermore by proper and optimized placement of the span at the transmission link, we can achieve good amplification factor with low noise power for the transmitted signal.

18-Aug-2011