

طراحی بهینه شبکه‌های WDM توسط تقویت‌کننده‌های نوری EDFA با رویکرد بهبود فاصله ارتباطی و نرخ ارسال داده

علی قربانی

دانشجوی کارشناسی ارشد، مربی گروه آموزشی فاوا دانشگاه امیرالمومنین^(ع) نرسا، اصفهان، ایران
(دریافت: ۱۳۹۹/۰۸/۱۷، پذیرش: ۱۴۰۰/۰۳/۲۶)

چکیده

امروزه سامانه‌های مالتی‌پلکسینگ تقسیم طول موج (WDM)، موجب بهره‌وری ارتباطات فیبر نوری شده است. یک مالتی‌پلکسر WDM، با کنار هم قرار دادن سیگنال‌های دریافتی از چند فرستنده مجزا، اقدام به ارسال آن‌ها با کمترین تلفات و پاشندگی در یک فیبر تک مد می‌کند. سیگنال‌های ارسالی، در گیرنده از یکدیگر تفکیک می‌شوند. استفاده از تقویت‌کننده‌های فیبر آلاییده به اربیم EDFA در شبکه‌های نوری مبتنی بر WDM، موجب افزایش نرخ ارسال داده و مسافت ارتباطی خواهد شد. در اینجا یک لینک ارتباطی فیبر نوری با سامانه WDM چهار کاناله در نظر گرفته می‌شود. از نرم افزار Optisystem جهت شبیه‌سازی لینک‌های مورد نظر، استفاده می‌کنیم. هدف اصلی، حداکثر نمودن توام فاصله ارتباطی بین فرستنده و گیرنده نوری و نرخ ارسال داده است. مقادیر مفروضی از فاکتور کیفیت QF و نرخ خطای بی‌تی BER، تضمین کننده کیفیت ارتباط هستند. در این مقاله، نتایج مهمی پس از شبیه‌سازی‌ها، به دست می‌آید. استفاده از این نتایج، در تحلیل عملکرد و طراحی سامانه‌های WDM با نرخ ارسال داده و مسافت ارتباطی مختلف، بسیار موثر است.

کلید واژه‌ها: فیبر نوری سینگل مد، مدولاسیون تقسیم طول موج، تقویت‌کننده نوری آلاییده به اربیم

۱- مقدمه

کیفیت QF^۵ و نمودار چشمی^۶ است [۲،۳]. شبیه‌سازی در اینجا با V.7 Optisystem انجام می‌شود.

۱-۱- فناوری مالتی‌پلکس تقسیم طول موج WDM

شبکه‌های نوری بر مبنای WDM در حال گسترش ارتباطات حوزه زیرساخت مخابرات هستند. آنها نقش مهمی در شبکه‌های نسل آینده^۷ ایفا خواهند کرد [۳].

WDM مربوط به فرآیند مالتی‌پلکسینگ سیگنال‌های دیجیتال، روی یک فیبر تک مد است. بازه مرسوم طول موج این سامانه‌ها حدود ۱۶۰۰-۱۵۰۰ nm با عنوان پنجره WDM هست. این تکنولوژی باعث افزایش بهره‌وری پهنای باند شبکه‌های نوری، بدون افزایش تعداد زوج‌های فیبر است. ارتباط فرکانس و طول موج با معادله (۱) نشان داده می‌شود.

$$C = \text{Wavelength} * \text{Frequency} \quad (1)$$

C یک ثابت و به مفهوم سرعت نور در یک فضا است. از این‌رو، طول موج، بدون تغییر فرکانس، قابل تغییر نیست. ولی

فناوری WDM^۱ به دنبال بهره‌وری هرچه بیشتر از شبکه‌های نوری ایجاد شد که در حال پیشرفت و گسترش است. این فناوری با عنوان WDM-OTDM^۲ نیز شناخته می‌شود. در برخی پژوهش‌ها و حتی تست‌های آزمایشگاهی در حال افزایش نرخ ارسال داده و مسافت ارتباطی این شبکه‌ها هستند. به عنوان مثال، نرخ ارسال ۱۲۰ Gbps در فاصله ۱۰۰ Km با فاکتور کیفیت $QF = 6/83$ توسط یک طراحی مناسب شبکه و استفاده مطلوب از تجهیزاتی مانند تقویت‌کننده‌های نوری EDFA^۳ در سال ۲۰۱۷ ارائه شد [۱]. یکی از پرکاربردترین نرم‌افزارهای شبیه‌سازی سامانه‌های نوری، Optisystem است. در این شبیه‌ساز، با اعمال تغییر در برخی مؤلفه‌های فرستنده، گیرنده، کانال و حتی سامانه‌های مورد استفاده، قادر هستیم نتایج خروجی را پیش‌بینی و مشاهده کنیم. خروجی‌های مهم نرم‌افزار که اغلب در قالب نمودار ارائه می‌گردد، شامل مؤلفه نرخ خطا بی‌تی BER^۴ و فاکتور

* رایانامه نویسنده مسئول: seven.mybox@gmail.com

^۵ Quality Factor

^۶ Eye Diagram

^۷ Next Generation Networks

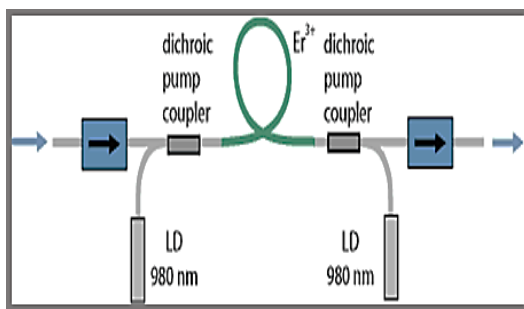
^۱ Wavelength Division Multiplexing

^۲ Optical Time Division Multiplexing

^۳ Erbium Doped Fiber Amplifiers

^۴ Bit Error Rate

این حال SOA ها به علت سرعت بالای پاسخ دهی، جهت سوئیچینگ و مسیریابی شبکه های نوری استفاده می شود [۹]. از دیگر تفاوت های قابل بررسی در تقویت کننده های نوری می توان به عرض باند فرکانسی قابل تقویت و نیز عملکرد آنها برای سیگنال های آنالوگ و دیجیتال اشاره کرد. EDFA به عنوان ترکیبی از چند فاکتور کلیدی برای یک سامانه امروزی مبتنی بر فناوری WDM اولویت دارد [۱۰]. عواملی مانند توان سیگنال ورودی، نوع مدولاسیون، تعداد کانال ها و فاصله کانالی، تعداد فیبر و نوع EDFA در دسترس، همگی بر طول مسیر انتقال، موثر هستند. اما در هر صورت، تلفیق صحیح EDFA با شبکه WDM باعث تحقق یک مسیر طولانی ارتباط، خواهد شد [۱۱]. سه روش مرسوم ساختاری برای کاربرد سامانه های EDFA در شبکه وجود دارد که شامل: Hybrid EDFA, Dual-Pumped EDFA, Multi stage EDF هستند [۱۲]. ساختار نوع Dual-Pumped در شکل (۲) نشان داده شده است.



شکل (۲): تقویت کننده فیبر اریومی از نوع Dual Pumped EDFA

در اینجا صرف نظر از انواع ساختار EDFA، به تحلیل و مقایسه روش های طراحی شبکه WDM می پردازیم. هدف از این کار، دستیابی به نتایجی است که ما را در طراحی شبکه بهینه کمک نماید. منظور از شبکه بهینه، افزایش فاصله ارتباطی بین فرستنده و گیرنده نوری توأم با افزایش نرخ ارسال داده، بدون تغییر قابل توجه در مؤلفه BER، است.

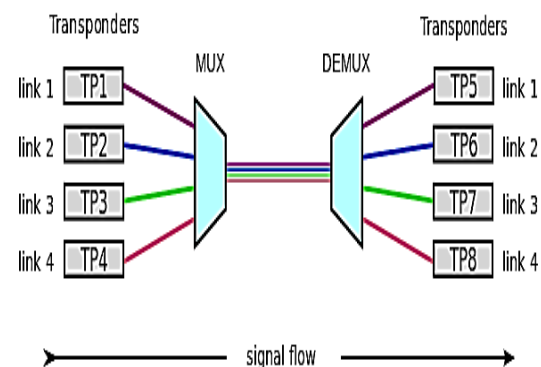
۱-۳- فاکتور کیفیت و نرخ خطای بی تی

در حقیقت، کیفیت آنالوگ یک سیگنال دیجیتال را با در نظر گرفتن SNR^۳ بیان می کند. SNR، شامل همه مؤلفه های مخرب فیزیکی انتقال دهنده سیگنال و ایجاد کننده BER خواهد بود [۱۳، ۱۴]. بیشترین مقدار QF معادل کمترین مقدار BER است. افزایش مسافت باعث افزایش تضعیف و در نتیجه افزایش BER یا کاهش QF می گردد. معادله (۱) نحوه محاسبه تضعیف در فیبر را بیان می کند.

$$\alpha = -10 \log \left(\frac{P_{out}}{P_{in}} \right) \quad (2)$$

نمی توان گفت که سامانه های WDM، FDM یکسان هستند. هر چند FDM و WDM مشابهت دارند ولی دو فاکتور مهم باعث تفاوت آنها می شود. اول آنکه FDM معمولاً برای سامانه های مرسوم با مالتی پلکسینگ سیگنال های الکتریکی بیان می شد ولی WDM برای سامانه های جدیدتر با مالتی پلکسینگ سیگنال های نوری مطرح است. دوم آنکه هر سیگنال مالتی پلکس شده در سامانه FDM، بیانگر وجود یک منبع ارسال سیگنال است اما یکی از اولین کاربردهای WDM ادغام سیگنال های نوری SONET^۲ بود. از این رو، در WDM سیگنال هایی است که هر کدام از آنها ممکن است حامل اطلاعات چندین منبع ادغام شده به روش TDM باشند. همچنین WDM برای دستیابی به پهنای باند بالاتر، فناوری های TDM، FDM را ترکیب می کند [۴]. شکل (۱) نحوه عملکرد یک سامانه WDM است.

wavelength-division multiplexing (WDM)



شکل (۱): نحوه عملکرد سامانه WDM

۱-۲- تقویت کننده فیبر دوپت شده اریومی EDFA

انتخاب یک تقویت کننده نوری در طراحی مناسب شبکه های نوری، بسیار مهم است. تقویت کننده های OEO فقط قادرند یک کانال نوری را تقویت کنند در حالی که تقویت کننده های نوری علاوه بر کاهش هزینه و حجم تجهیزات، در کل پهنای باند عملکرد خود یا تمام کانال های مجاور WDM به تقویت می پردازند [۵]. انواع تقویت کننده نوری از قبیل EDFA، SOA، Raman جهت غلبه بر تاثیرات تضعیف، ساخته شده اند. در این میان، ساختار EDFA نتایج بهتری را فراهم می آورد [۶، ۷]. به عنوان مثال، در EDFA، مکان انجام تقویت نوری، همان محیط فیبر نوری است. در تقویت کننده های SOA این عملیات در یک ساختار نیمه هادی انجام می شود. همچنین منبع انرژی در EDFA به صورت پمپ لیزری و در SOA، جریان الکتریکی است [۸]. با

³ Signal to Noise Ratio

¹ Frequency Division Multiplexing

² Synchronous Optical Networking

۲- پیکربندی سامانه WDM با نرخ ارسال ۳ Gbps و ۶ حالت‌های با و بدون EDFA

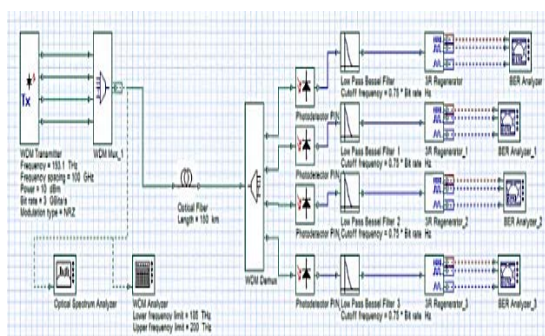
این سامانه شامل یک فرستنده WDM چهار کاناله با فرکانس کاری ۱ THZ (۱۹۳/۱)، فاصله کانالی ۱۰۰ GHz، توان ارسالی ۱۰ dBm و مدولاسیون NRZ^۱ است. چهار طول موج نوری، به وسیله این فرستنده تولید می‌شود. یک بلوک مالتی‌پلکس تقسیم طول موج نیز، طول موج‌های تولید شده توسط فرستنده را دریافت، با یکدیگر ادغام و در فیبرنوری تک مد^۲ با تضعیف^۳ ۰/۲ dB/km و پاشندگی^۴ ۱۶/۷۵ ps/nm/km ارسال می‌کند. در قسمت گیرنده، یک دمالتی‌پلکسر WDM وجود دارد. وظیفه آن، دریافت سیگنال ارسالی و تفکیک چهار طول موج مجاور از یکدیگر است. هر طول موج نوری پس از ورود به پین دیود مربوطه، از فیلتر بسل^۵ پایین‌گذر عبور می‌کند. خروجی هر کدام از فیلترها، به Regenerator ۳ R داده می‌شود. نتایج، با آنالیزهای BER قابل مشاهده و بررسی است.

۲-۱- سامانه WDM دارای نرخ ارسال ۳ Gbps و حداقل QF=۶/۱

با فرض این‌که $QF=6/1$ یک مقدار حداقلی مبنا و مورد انتظار برای دستیابی به ارتباطات نوری WDM مورد نظر باشد، به بررسی و تغییر در مولفه‌های طراحی پرداخته‌ایم.

۲-۱-۱- بدون EDFA

در این حالت، دیاگرام شبیه‌سازی بدون تقویت‌کننده نوری برای حداکثر انتقال داده ۳ Gbps در $QF=6/1$ مورد بررسی قرار گرفته که دستیابی به بیشترین فاصله انتقال داده معادل ۱۵۰ km را نشان می‌دهد. دیاگرام ارتباطی و نمودار چشمی، به ترتیب، در شکل‌های (۴) و (۵) آمده است.

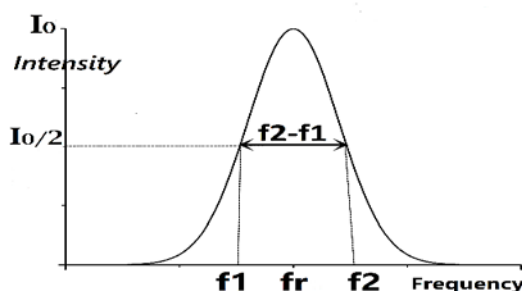


شکل (۴): بلوک دیاگرام شبیه‌سازی سامانه WDM با نرخ

۳ Gbps بدون EDFA

α میزان تضعیف است. در اینجا P_{in} و P_{out} به ترتیب بیانگر توان خروجی و توان ورودی سیگنال در فیبر هستند. معادله (۲) طریقه محاسبه فاکتور کیفیت را مشخص می‌کند. f_r و δf به ترتیب، فرکانس رزونانس و پهنای باند رزونانس سیگنال یا "پهنای باند نصف توان" هستند. شکل (۳) بیانگر مفهوم معادله (۲) است.

$$QF = \frac{f_r}{\delta f} \quad (3)$$



شکل (۳): نمودار پهنای باند نصف توان

معادله (۳) فاکتور کیفیت را به شکل دیگری تعیین می‌نماید.

$$QF = \frac{I_1 - I_0}{\sigma_1 - \sigma_0} \quad (4)$$

I_1 نشان‌دهنده سطح منطقی "1" و I_0 نشان‌دهنده سطح منطقی "0" هستند. σ_1 نشان‌دهنده واریانس استاندارد از سطح منطقی ۱ و σ_0 نشان‌دهنده واریانس استاندارد از سطح منطقی ۰ است. نحوه محاسبه نرخ خطای بی‌بی در معادله (۴) آمده است.

$$BER = \frac{bE}{vp \cdot t} \quad (5)$$

BER بیان‌کننده نسبت یا نرخ بیت‌های صحیح دریافت شده bE به کل بیت‌های دریافتی $vp \cdot t$ در زمان t می‌باشد.

نرخ خطای یکی از شاخص‌های اصلی کیفیت انتقال نوری است. در سامانه‌های واقعی، احتمال خطای تصمیم‌گیری در مورد مقدار نمونه‌های دریافتی، صفر نیست. هر نمونه بیانگر مقادیر ۰ یا ۱ منطقی است. نرخ خطای بی‌بی یک ارتباط واقعی با کیفیت مطلوب، حدود ۱۰^{-۱۲} و در اینجا ۱۰^{-۸}-۱۰^{-۸} در نظر گرفته شده که فاکتور کیفیت معادل هریک به ترتیب، حدود ۸/۱ و ۶/۱ خواهد بود. اغلب، در عمل، نرخ خطای بی‌بی از ۱۰^{-۷} نباید کمتر باشد. محاسبه نرخ خطای بی‌بی بر مبنای فاکتور کیفیت، طبق فرمول (۵) آمده است.

¹ Non Return Zero

² Single Mode

³ Attenuation

⁴ Dispersion

⁵ Bessel Filter

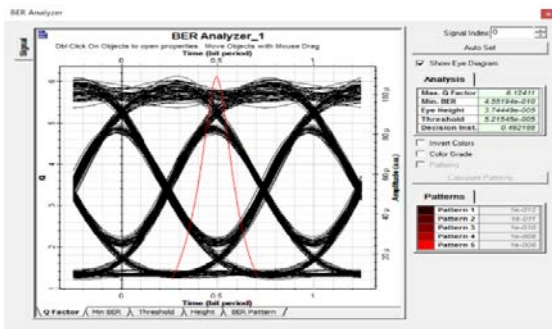
$$BER = \frac{1}{2} \operatorname{erfc} \left(\frac{Q}{\sqrt{2}} \right) \approx \frac{\exp \left(-\frac{Q^2}{2} \right)}{Q \cdot \sqrt{2\pi}} \quad (6)$$

۲-۲-۲- سامانه WDM دارای نرخ ارسال ۶ Gbps و حداقل $QF=6/1$

۲-۲-۱- بدون EDFA

این شبیه سازی، بدون تقویت کننده نوری برای حداکثر انتقال داده ۶ Gbps در $QF=6/1$ مورد بررسی قرار گرفته که دستیابی به بیشترین فاصله ۱۰۰ km را نشان می دهد.

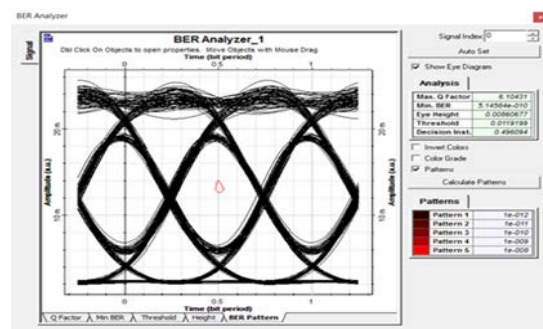
نتایج مشاهده شده نشان داد که در حالت عدم استفاده از تقویت کننده نوری، افزایش نرخ ارسال داده از ۳ Gbps به ۶ Gbps باعث کاهش فاصله ارتباطی به مقدار ۵۰ km (معادل ۳۳٪) شده است. نمودار چشمی در شکل (۸) آمده است.



شکل (۸): دیاگرام چشمی WDM با نرخ ۶ Gbps و $QF=6/1$ بدون EDFA

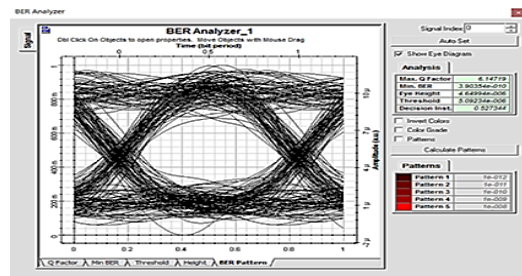
۲-۲-۲- با EDFA

یک مدار شبیه سازی با تقویت کننده نوری EDFA جدول (۱) با حداکثر نرخ داده ۶ Gbps با تقاضای $QF=6/1$ بررسی شده که دستیابی به بیشترین فاصله ممکن ۱۱۰ Km را نشان می دهد. نمودار چشمی مربوطه در شکل (۹) آمده است.



شکل (۹): دیاگرام چشمی WDM با نرخ ۶ Gbps و $QF=6/1$ با EDFA

مشاهده می شود که در این حالت فقط ۱۰ km معادل ۱۰٪ بهبود افزایش مسافت ارتباطی را نسبت به حالت بدون استفاده از EDFA خواهیم داشت.

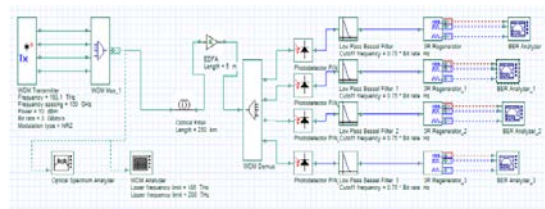


شکل (۵): دیاگرام چشمی شبیه سازی WDM با نرخ ۳ Gbps و $QF=6/1$ بدون EDFA

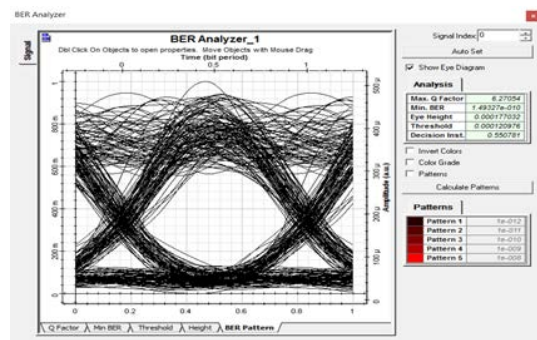
۲-۱-۲- با EDFA

در این قسمت، شبیه سازی با تقویت کننده نوری EDFA به طول ۵ m جدول (۱) برای حداکثر انتقال داده ۳ Gbps در $QF=6/1$ مورد بررسی قرار گرفته که دستیابی به بیشترین فاصله معادل در لینک های با نرخ ارسال کمتر از ۳ Gbps موجب افزایش ۲۵۰ km را نشان می دهد. نتایج نشان می دهد، استفاده از EDFA در چشمگیر مسافت ارتباطی خواهد شد. در اینجا طول فیبر نوری به مقدار ۶۶٪ افزایش داشت. دقت شود که برای مقدار QF نیز مقدار کمی افزایش داشته ایم.

در صورت نیاز به افزایش بیشتر مسافت ارتباطی به فاصله بیشتر از ۲۵۰ km میتوان باز هم فاصله را افزایش داد تا QF برای رسیدن به مقدار ۶/۱ کاهش یابد. دیاگرام ارتباطی و نمودار چشمی مربوطه به ترتیب، در شکل های (۶) و (۷) آمده است.



شکل (۶): بلوک دیاگرام شبیه سازی سامانه WDM با نرخ ۳ Gbps با EDFA



شکل (۷): دیاگرام چشمی WDM با نرخ ۳ Gbps و $QF=6/2$ با EDFA

جدول (۱): مشخصات EDFA

Core radius	۲,۲um	Length	۵m	Longitudinal steps	۱۰۰
Er doping radius	۲,۲um	Forward pump power	۱۰۰ mw	Noise center frequency	۱۹۳,۴ THz
Er metastable lifetime	۱۰ms	Backward pump power	.	Noise bandwidth	۱۳ THz
Numerical aperture	۰,۲۴	Forward pump wavelength	۹۸۰ nm	Noise bins spacing	۱۲۵ GHz
Er ion density	$۱e^{+۰.۲۵۳-m}$	Backward pump wavelength	۹۸۰ nm	Noise threshold	-۱۰۰dB
Loss at ۱۵۵۰nm	۰,۱ dB/m	Relative error	۰,۰۰۰۱	Noise dynamic	۳ dB
Loss at ۹۸۰nm	۰,۱۵ dB/m	Max. number of iterations	۵۰	Convert noise bins	----

حداکثر انتقال داده ۳ Gbps در $QF=6/1$ بدون EDFA مورد بررسی قرار گرفت که بیشترین فاصله انتقال داده را معادل ۱۵۰ km را نشان می‌دهد.

البته همین شبیه‌سازی در حضور EDFA به طول ۵m نیز انجام شد که در $QF=6/2$ دستیابی به بیشترین فاصله معادل ۲۵۰ km را نشان داد. نتایج نشان می‌دهد که استفاده از EDFA در لینک‌های با نرخ ارسال کمتر از ۳ Gbps موجب امکان افزایش چشمگیر مسافت ارتباطی خواهد شد. ما به مقدار $66/7\%$ توانستیم طول فیبر نوری را افزایش دهیم. دقت شود که در حضور EDFA برای مقدار QF نیز افزایش مختصری داشته‌ایم. در صورت نیاز به افزایش بیشتر مسافت ارتباطی به فاصله بیشتر از ۲۵۰ km میتوان باز هم فاصله را افزایش داد تا QF برای رسیدن به مقدار $6/1$ کاهش یابد.

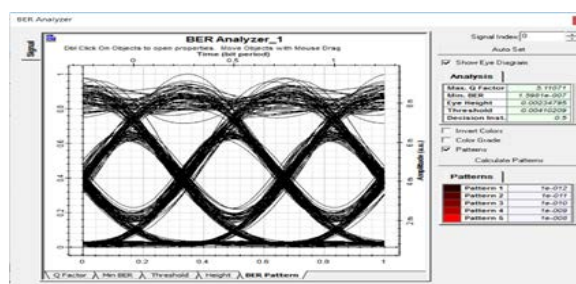
در این قسمت اهمیت چشمگیر وجود EDFA در افزایش فواصل لینک‌های نوری با نرخ ارسال پایین‌تر مانند ۳ Gbps مشخص شد.

مرحله دوم شبیه‌سازی، برای حداکثر انتقال داده ۶ Gbps در $QF=6/1$ بدون حضور EDFA مورد بررسی قرار گرفت که دستیابی به حداکثر فاصله ۱۰۰km را نشان داد. از این‌رو، در حالت عدم استفاده از EDFA، افزایش نرخ ارسال داده از ۳ Gbps به ۶ Gbps باعث کاهش فاصله ارتباطی به مقدار ۵۰ km (معادل $33/3\%$) شد.

همین فرایند را مجدداً در حضور EDFA به طول ۵ m انجام دادیم که دستیابی به بیشترین فاصله ممکن ۱۱۰km را نشان داد. در این حالت فقط ۱۰ km (معادل 10%) افزایش مسافت ارتباطی را نسبت به حالت بدون استفاده از EDFA خواهیم داشت.

در نتیجه استفاده از EDFA در سامانه‌های WDM با نرخ ارسال بالاتر نسبت به ۳ Gbps، منجر به افزایش قابل توجه طول

مشاهده می‌شود که هر چند در این حالت مقدار QF از $6/1$ به $5/1$ کاهش یافته و انتظار ما برای دستیابی به حداقل $QF=6/1$ برآورده نشده ولی مسافت ارتباطی معادل 75% نسبت به حالت ارسال نرخ بیت ۶ Gbps بدون EDFA، بهبود دارد؛ شکل (۱۰).



شکل (۱۰): دیاگرام چشمی سامانه WDM با نرخ ۶ Gbps و EDFA با $QF=5/1$

۳- جمع‌بندی و پیشنهادات

با تعیین $QF=6/1$ به‌عنوان یک کیفیت حداقلی مبنای، به تغییر در مولفه‌های طراحی پرداختیم. در مرحله اول، شبیه‌سازی برای در نتیجه می‌توان دریافت که استفاده از تقویت‌کننده‌های نوری EDFA در سامانه‌های WDM با نرخ ارسال بالا، منجر به دستیابی ما برای افزایش قابل توجه طول فیبر نوری نخواهد شد.

این در حالی است که کاربرد EDFA برای ارسال‌های با نرخ بیت پایین‌تر موجب افزایش مسافت ارتباط به میزان حداقل $66/7\%$ شده و نسبت به این حالت، بسیار مفیدتر واقع شده است.

۳-۱- سامانه WDM دارای نرخ ارسال ۶ Gbps با EDFA و فاکتور کیفیت تعدیل یافته

در این حالت یک مدار شبیه‌سازی با تقویت‌کننده نوری EDFA طبق جدول (۱) برای حداکثر انتقال داده ۶Gbps در فاصله ۱۷۵km مورد بررسی قرار گرفته که دستیابی به $QF=5/1$ را نشان می‌دهد شکل (۱۰).

افزایش قابل توجه در مسافت ارتباطی، تغییرات زیادی در مولفه QF یا BER رخ نخواهد داد. پس در چنین مواردی اگر نیاز به یک مقدار QF خیلی بالا نداریم و امکان کاهش مختصر آن وجود دارد، بهتر است که از مزیت افزایش طول مسیر انتقال بدون تغییر شدید در QF بهره ببریم.

نتایج به دست آمده، جهت تحلیل و مقایسه در جدول (۲) آمده است. اولین ستون سمت چپ، مربوط به حالاتی است که می‌خواهیم میزان بهبود آنها را در مقایسه با هر مورد از موارد ردیف بالا، مشاهده کنیم. به عنوان مثال مقایسه مورد دوم از ستون اول سمت چپ (با علامت * مشخص است) با مورد سوم از ردیف بالا (با علامت # مشخص است)، یک افزایش ۱۰۰ km یا ۶۶٪ را نشان می‌دهد. خانه‌های خالی داخل جدول که با رنگ تیره مشخص شده، بیانگر عدم افزایش بازدهی مسافت ارتباطی موارد ستون اول نسبت به موارد ردیف اول است.

فیبر نوری نشد. این در حالی است که استفاده از EDFA برای ارسال‌های با نرخ بیت پایین‌تر، موجب افزایش چشمگیر مسافت ارتباطی گردید.

در پایان اقدام به انجام یک مصالحه نمودیم. شبیه‌سازی با تقویت‌کننده نوری EDFA به طول ۵m برای حداکثر انتقال داده ۶ Gbps مورد بررسی قرار گرفته که دستیابی به فاصله ۱۷۵Km را برای $QF=5/1$ نشان داد. در اینجا مقدار QF از ۶/۱ به ۵/۱ تغییر یافته و انتظار ما برای حداقل $QF=6/1$ برآورده نشد. اما مسافت ارتباطی، معادل ۷۵٪ نسبت به حالت ارسال نرخ بیت ۶ Gbps بدون EDFA و همچنین نسبت به شرایط وجود EDFA، بهبود دارد. مصالحه صورت گرفته برای کاهش فاکتور کیفیت، معادل کمتر از ۱۶٪ بود.

از این‌رو، باید توجه داشت که در شبکه‌های با نرخ ارسال بالاتر، دستیابی به QF بالا، مشکل است. البته دقت شود که با

جدول (۲): مقایسه بهبود بازدهی طراحی‌ها

	No EDFA 3Gbps QF=6.1 150km	EDFA 3Gbps QF=6.2 250km	No EDFA 6Gbps QF=6.1 100km #	EDFA 6Gbps QF=6.1 110km	EDFA 6Gbps QF=5.1 175km
4 Channel WDM					
No EDFA, 3Gbps QF=6.1 , 150km			50km, 50%	40km, 26.7%	
EDFA, 3Gbps QF=6.2 , 250km *	100km, 66.7%		150km, 150%	140km, 127.3%	75km, 42.9%
No EDFA, 6Gbps QF=6.1 , 100km					
EDFA, 6Gbps Q=6.1 , 110km			10km, 10%		
EDFA, 6Gbps QF=5.1 , 175km	25km, 16.7%		75km, 75%	65km, 59.1%	25km, 16.7%

۵- مراجع

- [1] D. D. Falconer and S. L. Ariyavisitakul, "Broad band wireless using single carrier and frequency domain equalization," The 5th International Symposium on Wireless Personal Multimedia Communications, vol. 1, 2002.
- [2] Performance analysis of hybrid WDM-OTDM optical multicast overlay system employing 120 Gbps polarization and subcarrier multiplexed unicast signal with 40 Gbps multicast signal Sukhbir Singh, Surinder Singh, ELSEVIER, Optics Communications journal, 2017.
- [3] Optisystem Tutorials, Optical Communication System Design Software, vol. 1, Version13, Optiwave, 2014.
- [4] M. Sharma and S. Singh, "Investigating the Q-factor and BER of a WDM System in Optical Fibre Communication using Different Modulation Formats at Different Wavelengths," IJERT, pp. 625, 2015.
- [5] Chromatic Dispersion Compensation Effect Performance Enhancements Using FBG and EDFA Wavelength Division Multiplexing Optical Transmission System, Mounia Chakkour, Hindawi International Journal Optics 2017.
- [6] J. Long, "Storage Networking Protocol Fundamentals, Cisco System," USA, pp. 25-30, 2006.

۴- نتیجه‌گیری

استفاده از EDFA برای ارسال‌های با نرخ بیت پایین‌تر، موجب افزایش چشمگیر مسافت ارتباطی شد. اما EDFA در سامانه‌های WDM با نرخ ارسال بالاتر نسبت به ۳ Gbps، منجر به افزایش قابل توجه مسافت ارتباطی نمی‌شود.

در شبکه‌های با نرخ ارسال بالاتر مانند ۶ Gbps، دستیابی به QF بالا، مشکل است. در عوض با افزایش قابل توجه در مسافت ارتباطی، تغییرات زیادی در مولفه QF یا BER رخ نمی‌دهد. پس اگر نیاز به یک مقدار QF بالا نداریم و امکان مصالحه و کاهش مختصر آن وجود دارد، بهتر است که از مزیت افزایش چشمگیر طول مسیر انتقال، بدون تغییر شدید در QF بهره ببریم.

- (IMOC '15), Porto de Galinhas, Brazil, November 2015.
- [13] Q.M Wang and T.P.Lee, "In optical communications in China, Editors Singapore," pp. 372, 1996.
- [14] Applied Mierophotonics, Wes R.Jamroz-Roman Krvzelecky-Emilei.Haddad, Taylor and Francis Group, New York, 2006.
- [15] R. Sifa, P. Munster, O. Krajsa, and M. Filka, "Symulacja ruchu dwukierunkowego w sieci typu WDM PON," *Przegląd Elektrotechniczny*, vol. 90, no. 1, pp. 95–100, 2014.
- [16] J. Smiesko and J. Uramova, "Access node dimensioning for IPTV trafic using eective bandwidth," *Komunikacie*, vol. 14, no. 2, pp. 11–16, 2012.
- [7] Idelfonso Tafur Monroy- Eduward Tangdiongga, *Cross Talk in WDM Communication Networks*, , Eindhoven University of Technology, Springer Science, pp. 90-91, 2002.
- [8] P. Anuseetal and S. Singh, "Analysis of EDFA based 16-Channel C-Band OpticalWDM System for Dierent Pumping Schemes," *International Journal of Advanced Research in Electrical, Electronics and Instrumentation Engineering*, vol. 5, no. 6, June 2016.
- [9] S. Semmalar and S. Malarkkan, "Output signal power analysis in erbium-doped fber amplifier with pump ower and length variation using various pumping techniques," *ISRN Electronics*, vol. 2 .pp. 6, 2013.
- [10] Y. Said and H. Rezig, "Numerical modeling and experimental investigation of the nonlinear polarization rotation phenomenon in semiconductor optical amplifiers," *Advances in OptoElectronics*, vol. 2011, Article ID 143235, pp.7, 2011.
- [11] Comparison of the Optical Amplifiers EDFA and SOA Based on the BER and, Tomáš Ivaniga1 and Petr Ivaniga2, *Hindawi*, 2017.
- [12] D. Aguiar, G. Grasso, A. Righetti, and F. Meli, " EDFA with continuous amplification of C and L bands for submarine applications," in *Proceedings of the SBMO/IEEE MTT-S International Microwave and Optoelectronics Conference*