



پایان نامه مقطع کارشناسی ارشد مهندسی برق - مخابرات

طراحی و شبیه سازی الگوریتم های تخصیص طیف شبکه های نوری منعطف در مجازی سازی رایانش های ابری

نیوشا صبری کادیجانی

استاد راهنما:

دکتر لطف الله بیگی

زمستان ۱۴۰۰

بِسْمِ اللَّهِ الرَّحْمَنِ الرَّحِيمِ

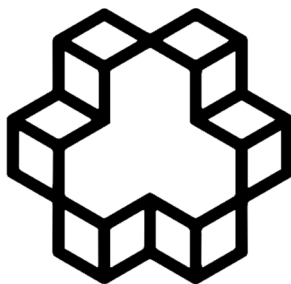
تأییدیه هیات داوران

اعضای هیئت داوران، نسخه نهائی پایان نامه خانم: نیوشا صبری کادیجانی

را با عنوان: طراحی و شبیه سازی الگوریتم های تخصیص طیف شبکه های نوری منعطف در مجازی سازی رایانش های ابری

از نظر شکل و محتوی بررسی نموده و پذیرش آن را برای تکمیل درجه کارشناسی ارشد تأیید می کنند.

اعضای هیئت داوران	نام و نام خانوادگی	رتبه علمی	امضاء
۱- استاد راهنما	دکتر لطف الله بیگی	استادیار	
۲- استاد داور	دکتر محمدیوسف درمانی	دانشیار	
۳- استاد داور	دکتر علیرضا نظام الحسینی	استادیار	
۴- نماینده تحصیلات تکمیلی	دکتر محمدیوسف درمانی	دانشیار	



دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی

اظهارنامه دانشجو

اینجانب **نیوشا صبری کادیجانی** دانشجوی مقطع ارشد رشته مهندسی برق گواهی می‌نمایم که مطالب ارائه شده در این پایان‌نامه با عنوان:

طراحی و شبیه‌سازی الگوریتم‌های تخصیص طیف شبکه‌های نوری منعطف در مجازی‌سازی رایانش‌های ابری

با راهنمایی استاد محترم **دکتر لطف الله بیگی** توسط شخص اینجانب انجام شده است. صحت و اصالت مطالب نوشته شده در این پایان‌نامه/رساله تأیید می‌شود و در تدوین متن پروژه قالب مصوب دانشگاه را به طور کامل رعایت کرده‌ام.

امضاء دانشجو:

تاریخ:

حق طبع، نشر و مالکیت نتایج

- ۱- حق چاپ و تکثیر این پایان نامه/رساله متعلق به نویسنده و استاد راهنمای آن است. هرگونه تصویربرداری از کل یا بخشی از پروژه تنها با موافقت نویسنده یا استاد راهنما یا کتابخانه دانشکده‌های مهندسی برق و کامپیوتر دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی مجاز است.
- ۲- کلیه حقوق معنوی این اثر متعلق به دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی است و بدون اجازه کتبی دانشگاه قابل واگذاری به شخص ثالث نیست.
- ۳- استفاده از اطلاعات و نتایج موجود پروژه بدون ذکر مرجع مجاز نیست.

تقدیم به:

پدرم با بوسه بر دستانش که وجودش مایه‌ی دلگرمی‌ام است،
مادرم با بوسه بر دستانش که وجودش برایم همه‌ی مهر است،
خواهر نازنینم که عطر حضورش تکرار خوشی‌های من است و
دلخوشی همیشگی‌ام؛ برادر عزیزم که صفایش مایه‌ی آرامشم است.

تشکر و قدردانی

شکر شایان نثار ایزد منان که توفیق را رفیق راهم ساخت تا این پایان نامه را به پایان برسانم . از استاد فاضل و اندیشمند **جناب آقای دکتر بیگی** به عنوان استاد راهنما که همواره نگارنده را مورد لطف و محبت خود قرار داده اند ، کمال تشکر را دارم همچنین از داوران گرامی **جناب آقای دکتر درمانی** و **جناب آقای دکتر نظام الحسینی** که زحمت داوری و تصحیح این پایان نامه را بر عهده گرفتند کمال سپاس را دارم.

لازم به ذکر است این پژوهش تحت شماره قرارداد RD-51-9911-0024 توسط مرکز تحقیق و توسعه شرکت ارتباطات سیار ایران (همراه اول) و جهت پیشرفت حوزه فناوری اطلاعات و ارتباطات مورد حمایت قرار گرفته است.

چکیده

مجازی‌سازی شبکه به دلیل افزایش تقاضا برای برنامه‌های کاربردی با کارایی بالا و خدمات شبکه ابری به یک راه‌حل کلیدی برای رفع نیازهای گسترده کاربران و برنامه‌ها تبدیل شده است. تعبیه شبکه نوری مجازی (VONE) بر روی شبکه‌های نوری منعطف (EONs) یک فناوری اساسی برای تحقق مجازی‌سازی شبکه است. تعبیه شبکه نوری مجازی بر روی شبکه‌های منعطف نوری به دلیل وجود شکاف‌های ناهم‌جوار و ناپیوسته، که به تکه‌تکه شدن طیف معروف است، از استفاده ناکارا و ضعیف از طیف رنج می‌برد. هدف از الگوریتم هماهنگ ارائه شده در این پژوهش که بر اساس توازن ترافیکی و سیاست تناسب دقیق است، به حداقل رساندن میانگین تعداد شکاف‌های استفاده شده و کوتاه کردن طول مسیر نور فیزیکی می‌باشد که یک پیوند نوری مجازی بر روی آن نگاشت داده می‌شود. الگوریتم ارائه شده، استفاده از طیف را بهبود می‌بخشد و احتمال مسدود شدن پهنای باند را کاهش می‌دهد.

طبق نتایج بدست آمده، الگوریتم پیشنهادی به نزدیک‌ترین نتایج به مدل ILP دست می‌یابد و میانگین تعداد شکاف‌های استفاده شده در یک توپولوژی پنج گره را تا ۲۱٫۹ درصد بهبود می‌بخشد. علاوه بر این، در یک توپولوژی بزرگ، طول مسیرهای نوری را که پیوندهای نوری مجازی بر روی آن نگاشت می‌شود، به میزان قابل توجهی کاهش می‌دهد و احتمال مسدودسازی پهنای باند در شبکه ۲۴ گره‌ای به حدوداً ۳۰ درصد بهبود می‌یابد.

کلید واژه: تعبیه شبکه نوری مجازی (VONE)، شبکه‌های نوری منعطف (EONs)، تکه‌تکه شدن طیف، رایانش ابری.

فهرست مطالب

صفحه	عنوان
ه.....	تأییدیه هیات داوران
ط.....	فهرست جدول‌ها
ک.....	اختصارات
ل.....	علامت‌ها و نشانه‌ها
۱.....	فصل ۱- مقدمه
۱.....	۱-۱- پیشگفتار
۲.....	۱-۲- طرح مسئله
۳.....	۱-۳- انگیزه
۳.....	۱-۴- مطالعات پیشین
۶.....	۱-۵- چالش‌ها و نوآوری در پژوهش
۷.....	۱-۶- ساختار پایان نامه
۹.....	فصل ۲- مباحث پایه
۱۰.....	۲-۱- شبکه‌های بستر نوری
۱۰.....	۲-۱-۱- شبکه‌های نوری تسهیم تقسیم طول موج سنتی
۱۴.....	۲-۱-۲- شبکه‌های نوری منعطف
۱۹.....	۲-۱-۳- اجزای شبکه نوری منعطف
۲۴.....	۲-۲- مجازی‌سازی برای پشتیبانی رایانش ابری
۲۵.....	۲-۲-۱- فناوری‌های شبکه مجازی
۲۶.....	۲-۲-۲- مفاهیم اصلی در مجازی‌سازی شبکه نوری
۳۳.....	۲-۲-۳- ویژگی‌های مهم در طراحی شبکه‌های مجازی
۳۵.....	۲-۲-۴- مدل تجاری
۳۵.....	۲-۲-۵- تعبیه شبکه مجازی
۳۷.....	۲-۳- تکه‌تکه شدن پهنای باند در شبکه‌های منعطف نوری
۳۸.....	۲-۳-۱- تاثیر تکه‌تکه شدن بر سیاست‌های تخصیص طیف

فصل ۳- روش پیشنهادی تحقیق.....	۴۳
۳-۱- تعریف مسئله.....	۴۳
۳-۱-۱- شبکه بستر.....	۴۳
۳-۱-۲- درخواست شبکه نوری مجازی.....	۴۳
۳-۱-۳- محدودیت‌ها.....	۴۴
۳-۲- تابع هدف.....	۴۶
۳-۲-۱- تعداد متوسط بیشینه شکاف‌های استفاده شده.....	۴۶
۳-۲-۲- احتمال مسدود شدن پهنای باند.....	۴۶
۳-۲-۳- میانگین جهش‌های نگاشت داده شده.....	۴۶
۳-۲-۴- نسبت تکه‌تکه شدن.....	۴۷
۳-۳- روش شهودی پیشنهادی.....	۴۷
۳-۳-۱- معیار رتبه‌بندی گره مجازی.....	۴۷
۳-۳-۲- معیار رتبه‌بندی گره فیزیکی.....	۴۸
۳-۳-۳- معیار توازن ترافیکی.....	۴۹
۳-۴-۳- معیار مسیر انتخابی.....	۵۱
۴-۳- مثالی از نگاشت.....	۵۲
فصل ۴- شبیه‌سازی و تحلیل نتایج.....	۵۷
۴-۱- مقایسه الگوریتم پیشنهادی و مدل ریاضی.....	۶۰
۴-۲- بررسی عملکرد الگوریتم در مقیاس درخواست‌های بالا.....	۶۲
فصل ۵- نتیجه‌گیری.....	۶۷
۵-۱- نتیجه‌گیری.....	۶۷
۵-۲- پیشنهادات.....	۶۸
فهرست مرجع‌ها.....	۷۲
انتشارات.....	۷۵

فهرست شکل‌ها

عنوان	صفحه
شکل ۱-۲. سیستم WDM نقطه به نقطه.....	۱۱
شکل ۲-۲. شبکه 50 ITU گیگاهرتز ثابت (هر شبکه ۲۰۰ گیگاهرتز بر ثانیه، DP 16QAM است).....	۱۲
شکل ۳-۲. (الف) همپوشانی زیر حامل‌های ناشی از فناوری OFDM در EON (ب) فراهم کردن رزولوشن ۱۲,۵ گیگاهرتز برای شبکه انعطاف‌پذیر امکان بسته بندی نزدیک تر کانال‌ها.....	۱۵
شکل ۴-۲. ویژگی‌های منحصربه‌فرد، یعنی تقسیم‌بندی پهنای باند، تجمع پهنای باند، تطبیق نرخ‌های داده چندگانه و تنوع منعطف منابع تخصیص‌یافته EONS.....	۱۷
شکل ۵-۲. معماری شبکه منعطف نوری.....	۱۹
شکل ۶-۲. طرحی از الف) BVT ب) S-BVT.....	۲۰
شکل ۷-۲. مثالی از تعداد مبدل‌های ارسال مورد نیاز در شبکه الف) با استفاده از BVT ب) با استفاده از S-BVT [۳۱].....	۲۱
شکل ۸-۲. مثالی از یک گره با دو S-BVT و فرمت‌های مدولاسیون مختلف [۳۱].....	۲۳
شکل ۹-۲. معماری S-BVT [۳۱].....	۲۴
شکل ۱۰-۲. مجازی‌سازی شبکه.....	۲۶
شکل ۱۱-۲. مجازی‌سازی پیوند.....	۲۷
شکل ۱۲-۲. ساختار شبکه‌های مجازی.....	۲۸
شکل ۱۳-۲. عنصرهای اصلی یک شبکه‌ی مجازی [۳۶].....	۲۹
شکل ۱۴-۲. انواع گره‌های موجود در یک شبکه‌ی انتقال نوری [۳۶].....	۳۰
شکل ۱۵-۲. انواع مختلف تجمیع پیوند [۳۶].....	۳۱
شکل ۱۶-۲. مدل تجاری.....	۳۵
شکل ۱۷-۲. مثالی از تعبیه شبکه نوری مجازی بر روی شبکه‌های نوری منعطف.....	۳۷
شکل ۱۸-۲. مقایسه سیاست‌های تخصیص طیف از نظر نسبت شکاف‌های موجود [۳۷].....	۴۱
شکل ۱-۳. مثالی از از تعبیه شبکه نوری مجازی بر روی شبکه‌های نوری منعطف.....	۴۴
شکل ۲-۳. معیار اهمیت گره.....	۴۸
شکل ۳-۳. در دسترس بودن طیف یک مسیر نور فیزیکی.....	۴۹
شکل ۴-۳. تفاوت سیاست تناسب دقیق و سیاست تناسب دقیق در بیشینه اندازه بلوک.....	۵۱

- شکل ۳-۵. نگاشت گره مجازی بر روی گره فیزیکی..... ۵۳
- شکل ۳-۶. مرحله نگاشت پیوند بر روی مسیرنوری فیزیکی منتخب..... ۵۵
- شکل ۳-۷. فلوچارت مربوط به الگوریتم پیشنهادی..... ۵۶
- شکل ۴-۱. توپولوژی های شبکه بستر..... ۵۹
- شکل ۴-۲. مقایسه عملکرد میانگین تعداد بیشینه شکاف های استفاده شده در شبکه ۵ گره..... ۶۱
- شکل ۴-۳. مقایسه عملکرد نسبت تکه تکه شدن در شبکه ۵ گره..... ۶۲
- شکل ۴-۴. نتایج شبیه سازی بر روی احتمال مسدودسازی پهنای باند بر روی شبکه ۵ گره..... ۶۳
- شکل ۴-۵. مقایسه عملکرد احتمال مسدودسازی پهنای باند بر روی شبکه ۱۴ گره DT..... ۶۴
- شکل ۴-۶. نتایج شبیه سازی بر روی احتمال مسدودسازی پهنای باند بر روی شبکه ۲۴ گره US..... ۶۴
- شکل ۴-۷. مقایسه عملکرد میانگین جهش های نگاشت شده در شبکه ۵ گره..... ۶۵
- شکل ۴-۸. مقایسه عملکرد میانگین جهش های نگاشت شده در شبکه DT..... ۶۵
- شکل ۴-۹. مقایسه عملکرد میانگین جهش های نگاشت شده در شبکه US..... ۶۶

فهرست جدول‌ها

عنوان	صفحه
جدول ۱-۲. ظرفیت کل فیبر با استفاده از WDM در باند C با شبکه ۵۰ گیگاهرتز.....	۱۳
جدول ۱-۳. مقادیر در دسترس بودن منابع.....	۵۵
جدول ۲-۳. مقادیر توازن ترافیکی.....	۵۵
جدول ۳-۳. مقادیر مسیر انتخابی.....	۵۶
جدول ۱-۴. پارامترهای شبیه‌سازی.....	۵۸

اختصارات

عنوان	علامت اختصاری
Bandwidth Variable Transponder	BVT
Bandwidth Wavelength Cross Connect	BWXC
Binary Phase-shift Keying	BPSK
Central Processing Unit	CPU
Dispersion Compensation Module	DCM
Dutsch Telecom	DT
Elastic Optical Network	EON
First Fit	FF
Frequency Slot	FS
Fragmentation Ratio	FR
Internet Service Provider	ISP
Infrastrucuter Service Provider	InSP
International Telecommunication Union Telecommunication	ITU-T
Integer Linear Programming	ILP
Layered Auxiliary Graph	LAG
Orthogonal Frequency Division Multiplexing	OFDM
Quadrature Amplitude Modulation	QAM
Quality of Service	QoS
Quadrature Phase Shift Keying	QPSK
Resource availability between nodes	RAN
Routing and Spectrum Assignment	RSA
Sliceable Bit Rate Variable Transponders	SBVT
Substrate Network	SN
Service Providers	SP
Traffic balancing	TB
United State Network	USNET
Virtual Optical Link	VOL
virtual Optical Netwrok	VON
Virtual Network Embedding	VNE
Virtual Network	VN
Virtual Machine	VM
Wavelength Division Multiplexing	WDM

علامت‌ها و نشانه‌ها

تعریف	علامت
گره فیزیکی	N_s
پیوند فیزیکی	L_s
گره مجازی	N_v
پیوند مجازی	L_v
منابع محاسباتی	CR
شکاف طیفی	f_s
منابع طیفی موردنیاز برحسب شکاف طیفی	BW_l^v
مسیرنوری فیزیکی	β
بیشینه شاخص شکاف طیفی	$\max FS_{used_k^s}$
تعداد پیوندهای مجازی در k امین درخواست شبکه مجازی	Nu_{vlink}
تعداد تمامی پیوندهای فیزیکی در شبکه بستر	Nu_{slink}
تعداد جهش‌های مسیرنوری فیزیکی	Hop
تعداد کل پیوندهای مجازی وارد شده به شبکه	num_{vol}
درجه گره	N_d
تعداد گره‌های مجازی نگاشت شده	adj
رتبه‌بندی گره مجازی	R_v
رتبه‌بندی گره فیزیکی	R_s
بلوک طیفی در دسترس	bl
تعداد شکاف‌های طیفی غیرقابل دسترس	U_{slot}
در دسترس بودن منابع	RAN
شکاف‌های طیفی موجود در هر مسیرنوری از S به S'	$fs_{a_s^s}$
تعداد شکاف‌های موجود در هر پیوند	fs_{value}
توازن ترافیکی	TB
بیشینه بلوک طیفی قابل دسترس	τ_r
مسیرانتخابی	LC

فصل ۱- مقدمه

۱-۱- پیشگفتار

با توسعه سریع اینترنت و فناوری‌های ارتباطی، تعداد زیادی از خدمات شبکه نوظهور مانند رایانش ابری، بازی های آنلاین، ارتباطات ویدیویی بلادرنگ و غیره به وجود آمده‌اند. افزایش تقاضای پهنای باند چالش‌های مهمی را برای شبکه انتقال نوری ستون فقرات^۱ بوجود آورده است [۱]. با این حال، شبکه‌های تسهیم^۲ طول موج سنتی (WDM^۳) پهنای باند ثابتی را بدون توجه به نرخ بیت ناهمگن درخواست‌ها به سرویس‌های مختلف اختصاص می‌دهد، به علت عدم انعطاف‌پذیری، ارائه خدمات را محدود کرده و منتج به استفاده نامناسبی از طیف می‌شود.

برای ارائه و تامین کارآمد این خدمات، شبکه‌های نوری منعطف (EON^۴) بر اساس فناوری تقسیم فرکانس متعامد (OFDM^۵) پیشنهاد شده‌اند [۲]. EONها می‌توانند طیف را با دانه‌بندی^۶ انعطاف‌پذیر تخصیص دهند و ظرفیت انتقال شبکه‌های نوری را افزایش دهند، بنابراین به طور گسترده به عنوان یک رویکرد امیدوارکننده برای شبکه‌های انتقال نوری نسل بعدی در نظر گرفته می‌شود [۲]. در همین حال، شبکه ارتباطی کنونی توسط اپراتورهای متعدد ساخته شده است، زمان‌بندی و مدیریت منابع شبکه در میان اپراتورهای مختلف

^۱ Backbone

^۲ Multiplexing

^۳ Wavelength Division Multiplexing

^۴ Elastic Optical Network

^۵ Orthogonal Frequency Division Multiplexing

^۶ Granularity

دشوار است، در نتیجه زیرساخت‌های شبکه برای تطبیق سرویس‌های اینترنتی نوظهور استخوان‌سازی^۱ می‌کنند [۳]. مجازی‌سازی شبکه به چندین شبکه مجازی مجزا و ناهمگن اجازه می‌دهد تا بر روی شبکه بستر^۲ مشترک وجود داشته باشند؛ در نتیجه هر شبکه مجازی می‌تواند به طور مستقل معماری شبکه، پروتکل‌ها و سرویس‌های خاص خود را اجرا کند که می‌تواند استفاده از منابع را تا حد زیادی افزایش دهد [۳].

۱-۲- طرح مسئله

مجازی‌سازی شبکه امکان استفاده مشترک از منابع فیزیکی را فراهم می‌کند. سنگ بنای این مدل، استفاده کارآمد از منابع فیزیکی محدود است. تعبیه شبکه مجازی (VNE)، به عنوان فناوری اساسی مجازی‌سازی شبکه، به تعبیه چندین شبکه مجازی با محدودیت منابع در شبکه‌های بستر اشاره دارد [۴]. بنابراین چگونگی تعبیه کارآمد شبکه‌های مجازی و به بیشینه رساندن استفاده از منابع شبکه‌های بستر مورد توجه محققان قرار می‌گیرد. در مسئله نگاشت شبکه نوری مجازی، دو شبکه وجود دارد: شبکه بستر با منابع محدود محاسباتی در هر گره فیزیکی و منابع طیفی محدود در هر پیوند^۳ فیزیکی که به علت استفاده از تسهیم و فناوری شبکه‌های منعطف نوری باید دو شرط پیوستگی و مجاوریت در آن ارضا شوند و شبکه نوری درخواست مجازی^۴.

مسئله نگاشت شبکه‌های مجازی یک مسئله NP-hard^۵ اثبات شده است، مدل ILP^۶ می‌تواند به طور مناسب و کارآمدی مسئله نگاشت شبکه‌های مجازی را حل کند [۳]. به علت پیچیدگی زمانی بسیار بالای مدل ریاضی برای شبکه‌های واقعی، الگوریتم‌های شهودی^۷ راه حل مناسبی می‌باشند. با نگاهی عمیق‌تر به مشکل

¹ Ossification

² Substrate Network

³ Link

⁴ Virtual Optical Network Request (VON)

⁵ Non-deterministic Polynomial-time

⁶ Integer Linear Programming

⁷ Heuristic

بهره‌وری طیفی حاصل از سیاست تخصیص طیف، الگوریتم شهودی در این پایان‌نامه ارائه شده‌است که به طور مشخص تکه‌تکه شدن طیف^۱ را سرکوب می‌کند.

۱-۳- انگیزه

یکی از چالش‌های اصلی در تحقق زیرساخت مجازی‌سازی، تعبیه شبکه‌های مجازی به نحوی کارآمد است که از شبکه بستر به‌طور مؤثری استفاده شود به طوری که بیشینه تعداد شبکه‌های مجازی در شبکه بستر نگاشت داده شوند [۵]. همچنین، بسته به کاربرد خاص، تعبیه شبکه مجازی ممکن است اهدافی مانند افزایش بهره‌وری طیفی داشته باشد. در موارد دیگر، ممکن است محدودیت‌های اضافی مانند پیوستگی و مجاوریت شکاف‌ها برای شبکه‌های منعطف نوری وجود داشته باشد. همه این محدودیت‌ها و اهداف خاص، مشکل تعبیه شبکه مجازی را پیچیده و حل آن را دشوار می‌کند. راه‌حل‌های زیادی برای یک نسخه ساده شده از مشکل تعبیه شبکه مجازی پیشنهاد شده است. در این پایان‌نامه الگوریتم شهودی با رویکرد رتبه‌بندی گره‌های فیزیکی و مجازی با آگاه بودن نسبت به تکه‌تکه شدن طیف در هنگام نگاشت پیوند^۲ و استفاده از توزیع ترافیکی و سیاست تخصیص طیف ارائه شده است تا راه‌حلی برای استفاده نامناسب از طیف باشد.

۱-۴- مطالعات پیشین

در سال‌های اخیر، نحوه تعبیه کارآمد شبکه‌های مجازی و به بیشینه رساندن استفاده از منابع شبکه‌های بستر مورد توجه پژوهشگران زیادی قرار گرفته‌است. مسئله VONE^۳ از دو زیر مسئله تشکیل شده است: نگاشت گره و نگاشت پیوند. رویکردهای VONE را می‌توان به صورت هماهنگ یا ناهماهنگ طبقه‌بندی کرد. رویکرد ناهماهنگ، دو زیر مسئله را به طور مستقل و بدون در نظر گرفتن روابط متقابل آن‌ها در نظر می‌گیرند. با این حال، در یک رویکرد هماهنگ، دو زیر مسئله به طور همزمان مورد بررسی قرار می‌گیرند. در [۶] یک

^۱ Spectrum Fragmentation

^۲ Link Mapping

^۳ Virtual Optical Network Embedding

مدل ILP برای حالت چندگانه ایستا VONE بر روی EON پیشنهاد شده‌است و یک مدل شهودی مبتنی بر سه طرح تامین مختلف ارائه داده است. علیرغم توانایی الگوریتم شهودی آن‌ها در کاهش بخشی از تکه‌تکه شدن طیف، هنوز مقداری تکه‌تکه شدن وجود دارد. در [۷] یک روش جدید رتبه‌بندی گره معرفی شده است و مشکل VONE را از طریق بهینه‌سازی ازدحام ذرات گسسته^۱ حل کرده‌است. نویسندگان [۸] پیشنهاد داده‌اند از بهینه‌سازی مجدد مسیرهای نوری موجود بر اساس روش رتبه‌بندی مسیر برای پرداختن به تکه‌تکه شدن استفاده شود، اگرچه فقط مسیرهای نوری را در نظر گرفتند. نویسندگان [۹] یک روش تکرارشونده^۲ برای مکان‌یابی مسیر پیشنهاد کرده‌اند تا تکه‌تکه شدن طیف را سرکوب کنند با عدم در نظرگیری ویژگی‌های توپولوژیکی گره‌های فیزیکی نتوانستند به خوبی تکه‌تکه شدن طیف را کاهش دهند.

در مرجع [۱۰] در طول فرآیند VONE بر مسئله زمان و تقسیم طیف متمرکز شده‌اند. آن‌ها بر اساس جداسازی درخواست‌های VON به دو کلاس زمانی، الگوریتم شهودی پیشنهاد داده‌اند؛ اگرچه نتوانستند به خوبی به تکه‌تکه شدن طیف رسیدگی کنند. مدل ILP ارائه شده در [۱۱] در یک EON بر اساس Multi-all or nothing commodity فقط بر روی یک درخواست VON^۳ متمرکز است، فرموله شده است. همچنین، آن‌ها دو الگوریتم شهودی را بر اساس گراف کمکی لایه‌ای^۴ پیشنهاد کرده‌اند. نویسندگان [۱۲] یک الگوریتم دوگانه برای استفاده موثر از طیف پیشنهاد کرده‌اند. آن‌ها نگاشتی دوگانه را طراحی کردند که در آن نگاشت اولیه کوتاه‌ترین مسیر را انتخاب می‌کند، در حالی که نگاشت ثانویه یک رویکرد تقویتی^۵ را پیاده‌سازی می‌کند بدون اطلاع از وضعیت شبکه که ممکن است در طول زمان تغییر کند. در [۱۳] یک روش جدید رتبه‌بندی گره را توسعه داده است و از بلمن فورد^۶ برای حل نگاشت پیوند استفاده کرده‌است. نویسندگان در [۱۴] یک استراتژی تخصیص طیف آگاه از تداوم را پیشنهاد کرده‌اند، که زیر شبکه‌های را

¹ Discrete Particle Swarm Optimization

² Iterative

³ Virtual Optical Network

⁴ Layered Auxiliary Graph

⁵ Reinforcement Approach

⁶ Bellman Ford

برای توصیف وضعیت شکاف‌های فرکانس در پیوندهای نوری فیزیکی اتخاذ می‌کند و سپس منابع طیف مورد نیاز را در یک زیرشبکه برای درخواست VON تخصیص می‌دهد.

در [۱۵] ظرفیت اسکان بلوک‌های طیف خالی را در مسیرهای نور فیزیکی فرموله کرده‌است تا مسیرهای نوری تکه‌تکه شدن طیف کمتر و بلوک‌های طیف خالی بزرگ‌تر را شامل شوند ولی به علت عدم آگاهی نسبت به تغییر حالت طیف در پیوندهای نوری فیزیکی قبل و بعد از تعبیه پیوندهای نوری مجازی موفق به کاهش قابل توجه در احتمال مسدودسازی نشده‌است. بر اساس مفهوم مجاورت طیف در دسترس (AvSA)، نویسندگان در [۱۶] یک الگوریتم VONE را پیشنهاد کرده‌اند که منابع محاسباتی گره و AvSA را هنگام نگاشت گره‌های مجازی^۱ (VNs) در نظر می‌گیرد. اگرچه هر دو [۱۶، ۱۵] به منابع محاسبه گره فیزیکی و تکه‌تکه شدن طیف پیوندهای مجاور آن توجه دارند، اما هیچ یک از آن‌ها متوجه تغییر حالت طیف در پیوند های نوری فیزیکی قبل و بعد از تعبیه پیوندهای نوری مجازی^۲ (VOL) نمی‌شوند، در نتیجه تعداد زیادی تکه‌تکه شدن طیف باقی مانده است.

نویسندگان [۱۷] تلاش کردند تا با کوتاه کردن طول مسیرنوری^۳ تعبیه شده در VOL استفاده نامناسب از پهنای باند را به حداقل برسانند. در نتیجه معیاری را برای اهمیت گره معرفی کردند که هم در درخواست های VON^۴ (شبکه نوری مجازی) و هم در شبکه‌های بستر در نظر گرفته می‌شود. بر اساس درجه گره و بیشینه شکاف موجود در آن مسیرنوری، در دسترس بودن منابع گره بستر انتخابی را برای تمام گره‌های دیگر ارزیابی کردند. آن‌ها همچنین ارزیابی کرده‌اند که پس از اعلام، چند جهش^۵ طول می‌کشد تا به آن گره برسد. براساس معیار در دسترس بودن منابع k مسیرنوری کاندید مشخص می‌شوند. یک استراتژی مسیر را بر اساس تخصیص طیف اولین تناسب^۶ اجرا کردند که وضعیت قبل از نگاشت VOL و وضعیت پس از نگاشت

¹ Virtual Nodes

² Virtual Optical Links

³ Lightpath

⁴ Virtual Optical Network requests

⁵ Hop

⁶ First Fit Spectrum Allocation Policy

آن VOL در بستر را در نظر می‌گیرد، اگرچه نا آگاهی از تأثیر قابل توجه سیاست تخصیص طیف بر تکه‌تکه شدن باعث عملکرد نسبتاً ضعیف الگوریتم پیشنهادی‌شان شده است.

۱-۵- چالش‌ها و نوآوری در پژوهش

خدمات شبکه ابری به عنوان یک مؤلفه اساسی در زیرساخت فناوری اطلاعات است که فرصت مناسبی را برای ارائه‌دهندگان خدمات اینترنت و اپراتورهای مخابراتی فراهم می‌کند تا از این طریق کسب درآمد کنند. بسیاری از شرکت‌ها، خدمات خود را به سمت زیرساخت‌های ابری سوق می‌دهند. تخمین‌ها نشان می‌دهد که اگر روندهای کنونی ادامه یابند، در طولانی مدت، قبض انرژی سالانه‌ای که به وسیله اپراتورهای دیتاسنترها پرداخت می‌شود از هزینه تجهیزات بسیار بیشتر خواهد بود [۵]. با توجه به اهمیت اقتصادی و زیست‌محیطی، هر دو بخش آکادمیک و صنعت روی توسعه الگوهای بهره‌وری انرژی برای رایانش ابری تمرکز کرده‌اند [۶]. مجازی‌سازی شبکه، جزئی قدرتمند برای چارچوب کاری^۱ زیرساخت به عنوان سرویس^۲ در شبکه‌های ابری است. مجازی‌سازی شبکه اجازه وجود همزمان و مشترک چند شبکه مجازی را در یک بستر فیزیکی که به عنوان شبکه بستر^۳ شناخته می‌شود می‌دهد. در چند سال اخیر، از چالش‌های اساسی و مهم VONE بر روی EON بهره‌وری پایین طیف است که ناشی از حضور شکاف‌های ناهم‌جوار و ناپیوسته در طیف است که به تکه‌تکه شدن طیف معروف است. برای این مشکل، از چالش‌های بزرگ آن به کمینه رساندن نسبت مسدود شدن احتمال پهنای باند درخواست‌های VON است.

در این پایان‌نامه، الگوریتم شهودی هماهنگ ایستا^۴ ارائه می‌شود که تا حدی از [۱۷] الهام گرفته شده است. الگوریتم پیشنهادی در حال مقابله با مشکل تکه‌تکه شدن طیف و بهبود استفاده از طیف می‌باشد. در این الگوریتم اولویت‌بندی هر گره مجازی (VN) در یک درخواست VON اولین قدم است. با توجه به روش رتبه

^۱ Framework

^۲ Infrastructure as a Service

^۳ Substrate

^۴ Static

بندی و وضعیت شبکه، یک گره فیزیکی برای نگاشت گره مجازی مشخص می‌شود در ادامه با رویکرد توازن ترافیکی، k مسیرنوری کاندید برای نگاشت VOL انتخاب می‌شوند. در نهایت، VOL با توجه به سیاست تخصیص طیف دقیق بر روی مسیرنوری منتخب نگاشت داده می‌شود.

۱-۶- ساختار پایان نامه

در ادامه، پژوهش به این صورت بخش‌بندی می‌شود که در فصل دوم به مباحث پایه‌ای مانند: علت مهاجرت به شبکه‌های منعطف نوری و اهمیت مجازی‌سازی و جنبه‌های مختلف آن بررسی می‌شود. در فصل سوم الگوریتم پیشنهادی هماهنگ شده با رویکرد آگاه نسبت به تکه‌تکه شدن طیف معرفی شده است. نتایج و بحث‌های شبیه‌سازی در فصل چهارم ارائه شده است و در انتها، فصل پنجم این پژوهش به نتیجه‌گیری مسئله و پیشنهادات پرداخته است.

فصل ۲- مباحث پایه

موفقیت جهانی اینترنت در سه دهه گذشته به انواع فناوری‌های زیرساختی برای اجرای پروتکل‌ها و برنامه‌های کاربردی توزیع شده بستگی دارد. با این حال، این تنوع به یک مانع واقعی برای توسعه اینترنت از نظر فناوری‌های اساسی و خدمات ارائه شده تبدیل شده است که به عنوان مشکل استخوان‌سازی شناخته می‌شود [۳]. از آنجایی که معماری فعلی متعلق به تعداد زیادی از ارائه‌دهندگان خدمات اینترنتی^۱ (ISP) است، اتخاذ یک معماری جدید بدون توافق بسیاری از سهامداران^۲ غیرممکن است و هر گونه ابتکار برای بهبود خدمات اینترنتی ماهیتی دشوار و دامنه محدودی خواهد داشت. در این زمینه، مجازی‌سازی شبکه به طور فزاینده‌ای به عنوان راه‌حلی برای استخوان‌سازی اینترنت دیده می‌شود [۱]. ایده اصلی مجازی‌سازی شبکه جدا کردن زیرساخت از خدمات در ISP‌های سنتی است. نتیجه آن دو نهاد^۳ جدید است: ارائه‌دهنده خدمات (SP) و ارائه‌دهنده زیرساخت (InP). در این مدل تجاری، InP‌ها مسئول تخصیص بخشی از منابع شبکه‌های فیزیکی خود (گره‌های فیزیکی که با پیوندهای فیزیکی به هم متصل هستند) به SP‌ها می‌شوند [۳]. در همین حال، رشد سریع ترافیک اینترنت باعث تحریک تحقیق و توسعه در زمینه انتقال نوری و فناوری‌های سوئیچینگ، برای مقیاس‌بندی شبکه‌های مترو^۴ و اصلی به صورت مقرون به صرفه شده است. یکی از مثال‌های معروف، معرفی شبکه‌های نوری منعطف با شبکه انعطاف‌پذیر^۵ است [۱۸].

^۱ Internet Service Provider

^۲ Stakeholders

^۳ Entity

^۴ Metro network

^۵ Flex-grid

۲-۱- شبکه‌های بستر نوری

فیبرهای نوری به طور فزاینده‌ای در ارتباطات فیبر نوری مستقر می‌شوند، زیرا امکان انتقال در فواصل طولانی تر و پهنای باند بالاتر (نرخ داده) را نسبت به کابل‌های سیمی فراهم می‌کنند. هر دو ویژگی به دلیل تلفات کمتر و تعداد کانال‌های بیشتر است که می‌توانند به طور همزمان در محدوده طیف گسترده خود منتقل شوند [۱۹]. ناحیه بین $1.3 \mu m$ تا $1.6 \mu m$ برای انتقال در فیبر نوری استفاده می‌شود. در این منطقه، باند C کمترین تلفات را در کل طیف فیبر نشان می‌دهد و برای انتقال در فواصل بسیار طولانی (از ده‌ها تا هزاران کیلومتر) استفاده می‌شود. باند C به طول موج‌های حدود $1550 nm$ اشاره دارد و شامل طول موج‌هایی بین $1525 nm$ (یا فرکانس $195.9 THz$) و $1565 nm$ ($191.5 THz$) است [۲۰].

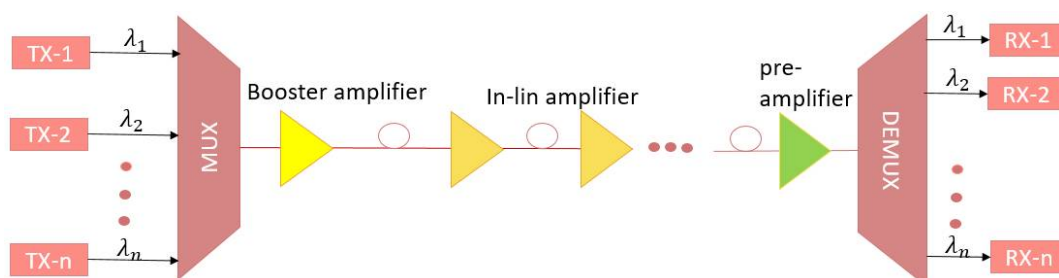
۲-۱-۱- شبکه‌های نوری تسهیم تقسیم طول موج سنتی

تسهیم تقسیم طول موج (WDM) نشان دهنده فناوری است که تعدادی از حامل^۱های سیگنال نوری را قادر می‌سازد تا با استفاده از طول موج‌های مختلف به یک فیبر نوری منفرد منتقل شوند. بخش استانداردسازی ارتباطات اتحادیه بین‌المللی مخابرات (ITU-T) جدولی از تمام طول موج‌ها و فرکانس‌های مرکزی متناظر آن‌ها را مشخص کرده است تا امکان استفاده یکپارچه از کل باند C را فراهم کند. این فهرست در توصیه ITU-T G.694.1 مشخص شده است [۲۱]. در ابتدا، طول موج‌های WDM در شبکه‌ای با فرکانس نوری 100 گیگاهرتز (حدود 0.8 نانومتر) با فرکانس مرجع ثابت در $193.1 THz$ (1552.52 نانومتر) قرار داشتند.

در دهه گذشته، تعداد زیادی از نوآوری‌های قابل توجه، ظرفیت را حدود 20 برابر (در مقایسه با سیستم‌های WDM قدیمی با سرعت 10 گیگابیت بر ثانیه در فاصله 100 گیگاهرتز) افزایش داده‌اند تا با رشد مداوم ترافیک مقابله کنند. ابتدا، می‌توان کانال‌ها را با فاصله 50 گیگاهرتز (حدود 0.4 نانومتر) در شبکه‌های اصلی فشرده کرد و امکان انتقال حدود 80 (و اخیراً 96) کانال را فراهم کرد [۲۲]. علاوه بر این، پهنای باند کانال با ساخت تجهیزات اپتوالکترونیکی در سطوح بیت بالاتر، که اغلب در داخل سیستم 50 گیگاهرتز کار می‌

¹ Carrier

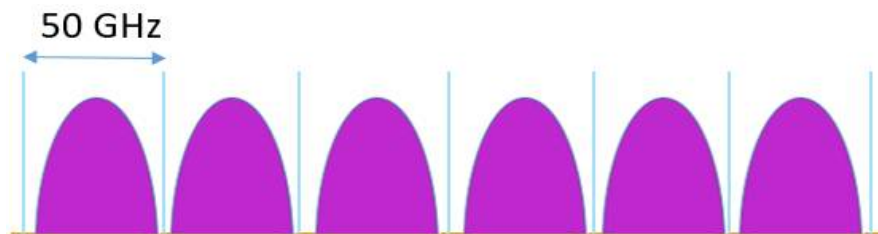
کنند، از ۲,۵ به ۱۰ گیگابیت بر ثانیه، سپس به ۴۰ گیگابیت بر ثانیه و تا ۱۰۰ گیگابیت در هر طول موج از آن زمان بهبود یافته است. از سال ۲۰۱۰؛ این عرض کانال و نرخ بیت عملکرد طیفی ۲ بیت/ثانیه/هرتز را ممکن می‌سازد [۲۳]. برخلاف روزهای اولیه شبکه‌های WDM، زمانی که پهنای باند فیبر نوری بی‌نهایت شناخته می‌شد، در آینده نزدیک، طیف نوری منبع محدودی خواهد بود و امروزه صنعت در حال تحقیق در مورد راه‌هایی برای افزایش عملکرد کلی طیف است. بهبود در تکنیک‌های انتقال سیگنال باعث کاهش طیف اشغال شده توسط سیگنال‌های نوری شده است: ترکیب تکنیک‌های تشخیص منسجم با شکل‌دهی پالس نایکونیست اجازه می‌دهد ۱۰۰ گیگابیت بر ثانیه در کمتر از ۳۳ GHz مخابره شود [۲۰]. افزایش نرخ بیت تک حامل بیش از ۱۰۰ Gb/s مستلزم استفاده از مدولاسیون دامنه چهارگانه مرتبه بالاتر (QAM) است - به عنوان مثال، ۱۶-QAM نرخ بیت را در مقایسه با تغییر کلید فاز چهارگانه (QPSK) دو برابر می‌کند و بنابراین، ۲۰۰ Gb/s را ارائه می‌دهد [۲۴]. اولین پیامد در این برنامه نیاز به اندازه کانال بیشتر است که شبکه سنتی ۵۰ GHz در هر کانال را نقض می‌کند.



شکل ۲-۱. سیستم WDM نقطه به نقطه

شکل ۲-۱ شماتیک سیستم WDM نقطه به نقطه را نشان می‌دهد که در آن چندین کانال طول موج در فرستنده‌های نوری ایجاد می‌شود که هر کدام توسط یک سیگنال داده مدوله شده و سپس توسط یک مالتی پلکسر WDM ترکیب می‌شوند. سیگنال ترکیبی WDM سپس از طریق یک اتصال فیبر نوری با تقویت کننده‌های نوری توزیع می‌شود تا سیگنال را قبل از تحویل بهبود بخشد، که دلیل آن تخریب فیبر

در هر دهانه و افزایش حساسیت گیرنده است. همانطور که در شکل ۲-۱ نشان داده شده است، تقویت کننده‌های خطی معمولاً تقویت کننده‌های دو مرحله‌ای هستند، که در آن مازول جبران پراکندگی (DCM)^۱ برای تصحیح پراکندگی فیبر رنگی در هر دهانه استفاده می‌شود. از طرف دیگر، پراکندگی فیبر را می‌توان با استفاده از تجهیزات منسجم در گیرنده‌های منسجم متعادل کرد. بنابراین، جدیدترین شبکه‌های WDM برنامه‌ریزی شده‌اند که بدون DCM باشند تا کارایی بهینه با زیرساخت منسجم برای سرعت‌های بالاتر امکان‌پذیر باشد. مالتی پلکسر WDM در انتهای فرستنده برای تقسیم سیگنال WDM به کانال‌های مختلف استفاده می‌شود و گیرنده‌های نوری سیگنال‌های داده را بازیابی می‌کنند [۲۰، ۲۴].



شکل ۲-۲. شبکه 50 ITU گیگاهرتز ثابت (هر شبکه ۲۰۰ گیگاهرتز بر ثانیه، DP 16QAM است).

فناوری WDM روشی کارآمد برای افزایش ظرفیت شبکه است. اگرچه پهنای باند با تعداد کانال‌های WDM بهبود می‌یابد، اما همه کانال‌های WDM از زیرساخت شبکه یکسانی استفاده می‌کنند، از جمله فیبر نوری، تقویت کننده‌های نوری، DCM، مالتی پلکسر WDM و مالتی پلکسر [۲۰]. بنابراین، هزینه شبکه نیز به اشتراک گذاشته می‌شود و در نتیجه هزینه هر کانال کمتر می‌شود. اگر تقاضای ترافیک افزایش یابد، ظرفیت شبکه با معرفی فرستنده‌های اضافی (یعنی فرستنده و گیرنده) در نقاط پایانی ترافیک بهبود می‌یابد. علاوه بر این، سیستم WDM برای کانال‌های طول‌موجی که سیگنال‌های داده را در خود نگه می‌دارند باز است. سرعت‌های مختلف داده و انواع مدولاسیون نیز برای کمک به بهبود ظرفیت شبکه اضافه خواهد شد.

¹ Dispersion Compensation Module

به عنوان مثال، زمانی که پیاده سازی سیستم WDM در اواسط سال ۱۹۹۰ آغاز شد، نرخ داده غالب 2.5 Gb/s بود. با رشد فناوری‌ها، سرعت داده به 10 Gb/s و سپس با استفاده از فرمت‌های مدولاسیون مدرن به 40 Gb/s افزایش یافت. اخیراً، ۱۰۰ گیگابیت بر ثانیه با پیشرفت‌هایی در فناوری‌های منسجم و پردازش سیگنال نوری، به راحتی در دسترس بوده است. این در حال حاضر به سرعت در سراسر شبکه اجرا می‌شود.

جدول ۱-۲. ظرفیت کل فیبر با استفاده از WDM در باند C با شبکه ۵۰ گیگاهرتز.

نرخ داده Gb/s	ظرفیت کل (Tb/s)			بهره‌وری طیفی (bits/s/Hz)
	$80 \text{ } \lambda\text{s}$	$88 \text{ } \lambda\text{s}$	$96 \text{ } \lambda\text{s}$	
۲,۵	۰,۲	۰,۲۲	۰,۲۴	۰,۰۵
۱۰	۰,۸	۰,۸۸	۰,۹۶	۰,۲
۴۰	۳,۲	۳,۵۲	۳,۸۴	۰,۸
۱۰۰	۸	۸,۸	۹,۶	۲

جدول ۱-۲ قدرت کلی فیبرها را در یک شبکه ۵۰ گیگاهرتز با استفاده از WDM نشان می‌دهد. برای شبکه‌های صنعتی WDM، در طول سال‌ها، پهنای باند فیبر ناخالص از 0.24 Tb/s با سرعت داده Gb/s ۲,۵ به بیشینه 9.6 Tb/s با سرعت داده 100 Gb/s افزایش یافته است [۲۴]. باید به خاطر داشت که استفاده از فیبر نوری نیز به طور چشمگیری بهبود یافته است، همانطور که با افزایش کیفیت طیفی از ۰,۰۵ به ۲ بیت بر ثانیه در هرتز با افزایش نرخ داده به 100 Gb/s نشان داده شده است. بازده طیفی زمانی که سرعت داده به بالای 100 Gb/s می‌رسد با انتقال زیرساخت شبکه از شبکه ثابت WDM به شبکه‌های مقیاس پذیر افزایش می‌یابد، که در بخش زیر به طور عمیق‌تر مورد بحث قرار خواهد گرفت.

۲-۱-۲- شبکه‌های نوری منعطف

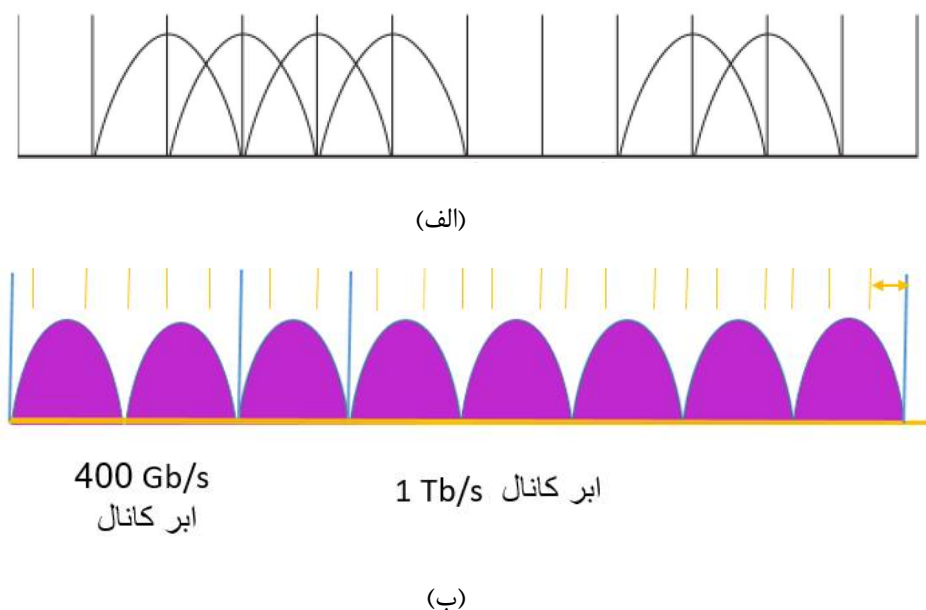
برای شبکه‌های فعلی، داشتن یک شبکه استاندارد جدید که بهترین بازده طیفی را برای افزایش تنوع نیازهای طیفی امکان‌پذیر می‌سازد ضروری است (به عنوان مثال یک کانال 100 Gb/s در فرکانس 37.5 GHz و 400 Gb/s در 75 GHz) [۲۵]. برای حل این مشکل، ITU-T یک شبکه ظریف‌تر را معرفی کرد که یک شکاف فرکانس متغیر را با یک پیوند نوری مرتبط می‌کند، به نام شبکه فرکانس انعطاف‌پذیر یا به طور کلی، شبکه انعطاف‌پذیر. این شبکه نوری شبکه انعطاف‌پذیر^۱ با نام Elastic Optical Network (EON) نیز شناخته می‌شود. شبکه انعطاف‌پذیر تعداد مشخصی (n) شکاف با اندازه ثابت را قادر می‌سازد تا بر اساس الزامات به یک کانال نوری اختصاص داده شود. یک شکاف 12.5 GHz وزن دارد و کانال‌های 100 Gb/s را قادر می‌سازد در 37.5 GHz ($n = 3$) به جای 50 GHz در شبکه ثابت پخش شوند. تأثیر شبکه انعطاف‌پذیر بر انتقال در شکل ۲-۳ نشان داده شده است. در این مثال، شبکه انعطاف‌پذیر می‌تواند از ۸ کانال به جای ۶ کانال ۲۰۰ گیگابیت بر ثانیه پشتیبانی کند، اما همچنین می‌تواند در صورت نیاز این کانال‌ها را در ابرکانال‌هایی گروه‌بندی کند که می‌توانند به عنوان یک موجودیت واحد از طریق یک شبکه نوری منتقل شوند [۲۰].

از زمان معرفی فناوری‌های نوظهور، شبکه‌های ارتباطی به سرعت در حال تکامل هستند. شبکه، تقسیم‌بندی طیف نوری را با دانه بندی بسیار بالا امکان‌پذیر می‌کند و حتی ممکن است شکاف‌های طیفی بزرگ تصادفی در اطراف یک شبکه تنظیم و توزیع شوند. نرخ انعطاف‌پذیر به فرستنده‌های گیرنده اجازه می‌دهد تا برای فرمت‌های مدولاسیون مختلف کار کنند تا بیشینه بازده طیفی را برای مسیرهای نوری مشخص به دست آورند. شبکه انعطاف‌پذیر شامل فناوری‌های جدید LCoS برای فعال کردن کنترل فیلتر نوری خوب است، در حالی که نرخ انعطاف‌پذیری از پیشرفت‌های اخیر در انتقال منسجم برای گنجاندن تغییرات در قالب مدولاسیون استفاده می‌کند. ترکیب این دو تعریف امکان طراحی کابل‌های پهنای باند وسیع را فراهم می‌کند که در آن چندین کانال فرعی در کنار هم قرار می‌گیرند تا یک ابرکانال^۲ ایجاد کنند و پهنای باندی در

^۱ Flex-grid

^۲ Super channel

مقیاس TB/s فراهم کنند. این یک رویکرد جدید جسورانه برای شبکه‌های ارتباطی کلیدی است که حمل و نقل نوری آینده بسیار مقیاس پذیر را ارائه می‌دهد که از منابع طیف فیبر نوری موجود تا بیشینه ظرفیت خود استفاده می‌کند [۲۶].



شکل ۲-۳. (الف) همپوشانی زیر حامل‌های ناشی از فناوری OFDM در EON (ب) فراهم کردن رزولوشن ۱۲٫۵ گیگاهرتز برای شبکه انعطاف‌پذیر امکان بسته بندی نزدیک تر کانال‌ها

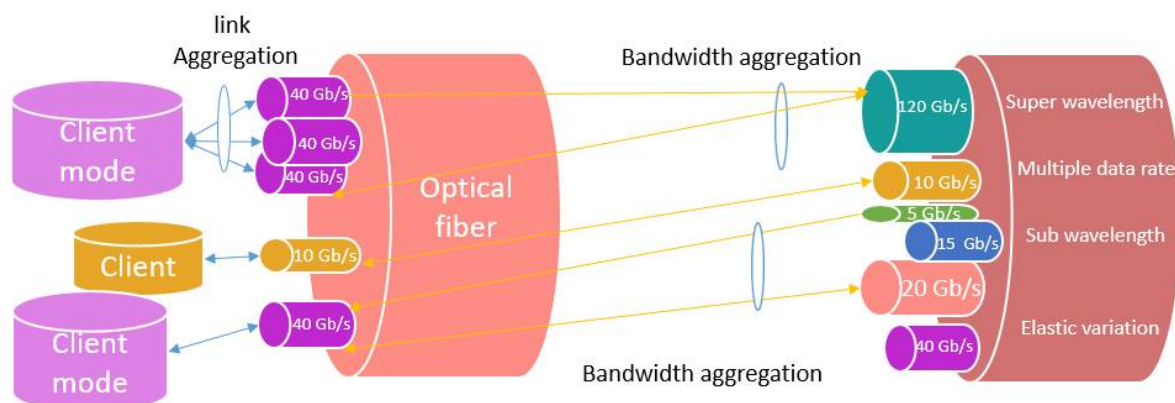
این انعطاف‌پذیری در شبکه‌های نوری، شبکه‌های هسته‌ای مترو را قادر می‌سازد تا کارایی بهتر داشته باشند، به این معنا که با گسترش و توسعه شبکه، اتصالات مستقیم جدید بین گره‌ها امکان‌پذیر خواهد بود. در نهایت، شبکه‌های اصلی باید از لوله‌های طیف نوری ثابت سفت و سخت به منابع انعطاف‌پذیر پویا توسعه یابند که قادر به قرار دادن مقادیر دلخواه از خدمات طیف بین گره‌ها در صورت تقاضا و حمل چندین ترابایت بر ثانیه داده باشند [۲۷].

چنین پیشرفت‌هایی مانند ایده اولیه WDM انقلابی خواهند بود که شبکه‌های اصلی ما را قادر می‌سازد تا در آینده نزدیک نیازهای رو به رشد پهنای باند را برآورده کنند.

با این وجود، تنها انگیزه مهاجرت عدم توانایی شبکه سنتی WDM نیست. محرک‌های دیگری نیز وجود دارند که استقرار تدریجی فناوری شبکه انعطاف‌پذیر را توجیه می‌کنند که به شرح زیر است:

- استفاده از نرخ‌های داده بالاتر و فرمت‌های مدولاسیون تخصصی برای پیوندهای مختلف در کوتاه مدت (۲۰۱۴-۲۰۱۶) سیگنال‌های مقرون به صرفه ۴۰۰ گیگابیت بر ثانیه (و فراتر از آن) را ممکن می‌سازد.
- معرفی فرستنده‌های تجاری متغیر نرخ بیت قابل برش^۱ (SBVT) رویدادی حیاتی در میان مدت (۲۰۱۷-۲۰۱۹) برای گسترش پوشش مناطق شبکه انعطاف‌پذیر به بخش‌های خاصی خواهد بود که در آن، در حالی که پهنای باند هنوز اشباع نشده است، فرصتی برای تقسیم چند جریان مفید خواهد بود. SBVTها، BVTهایی با سطح یکپارچگی هستند که به چندین تعدیل‌کننده نیاز دارند: بنابراین می‌توانند در صورت نیاز، کانال‌های فوق‌العاده گسترده یا کانال‌های جداگانه کوچک‌تر بسازند.
- در بلندمدت، ناشی از دست و پنجه نرم کردن با حجم ترافیک پیش‌بینی شده Tb/s یا حتی چند Pb/s است که مستلزم امکان پیاده‌سازی شبکه انعطاف‌پذیر از معماری‌های شبکه مختلف در سراسر شبکه است. سپس زیرساخت شبکه ثابت قدیمی به طور کامل به شبکه انعطاف‌پذیر اصلی تبدیل خواهد شد.

^۱ Sliceable Bandwidth Variable Transponder



شکل ۲-۴. ویژگی‌های منحصربه‌فرد، یعنی تقسیم‌بندی پهنای باند، تجمع پهنای باند، تطبیق نرخ‌های داده چندگانه و تنوع منعطف منابع تخصیص‌یافته EONs

شکل ۲-۴ ویژگی تخصیص طیف انعطاف‌پذیر بر اساس نیاز مشتری در EON را نشان می‌دهد. مزایای EON نسبت به WDM شامل تقسیم‌بندی شبکه، تجمیع شبکه، تطبیق مؤثر چندین سطح داده، تنوع منابع توزیع‌شده پویا^۱، نرخ خط قابل تطبیق و غیره است [۲۸].

- تقسیم‌بندی پهنای باند: شبکه‌های نوری سنتی نیاز دارند که پهنای باند طول‌موج به طور کامل به یک مسیرنوری از یک جفت گره انتهایی اختصاص داده شود. با این وجود، شبکه‌های نوری منعطف دارای یک تقسیم‌بندی کارآمد از نظر طیفی از پهنای باند (که گاهی اوقات به نام زیرموج نامیده می‌شود) دارند که ظرفیت دسترسی کسری را به پهنای باند ارائه می‌کند. اگر تنها به پهنای باند جزئی نیاز باشد، همانطور که در شکل ۲-۴ مشاهده می‌شود، شبکه نوری منعطف می‌تواند تنها پهنای باند نوری کافی را برای رضایت ترافیک مشتری اختصاص دهد، جایی که پهنای باند نوری ۴۰ گیگابیت بر ثانیه به سه طول‌موج فرعی تقسیم می‌شود، مانند ۵ Gb/s، ۱۵ Gb/s و ۲۰ Gb/s. در همان زمان، هر گره در مسیرنوری یک اتصال متقاطع با پهنای باند طیف مورد نیاز را برای ایجاد یک مسیرنوری سرتاسر با فاصله قابل قبول اختصاص می‌دهد. استفاده بهینه از سرمایه شبکه مستلزم دسترسی به پهنای باند کسری برای ارائه مقرون به صرفه است.

^۱ Dynamic

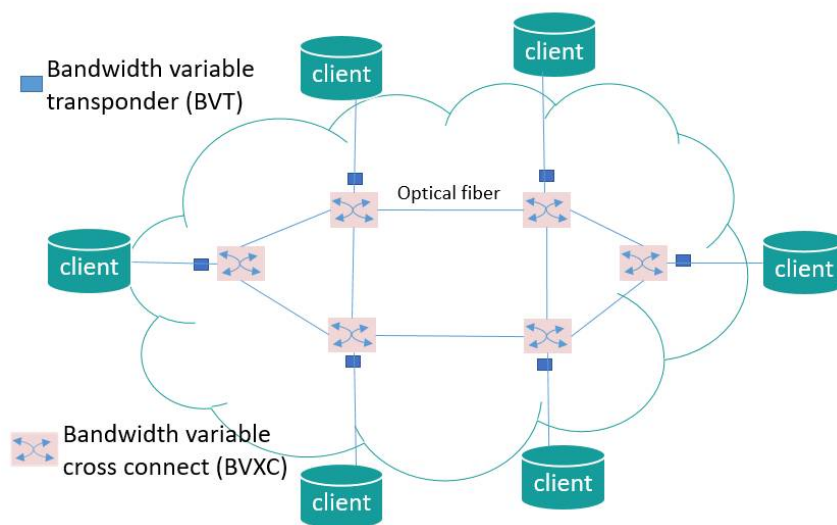
- تجمیع پهنای باند: تجمیع پیوند یک سیستم بسته شبکه یکپارچه IEEE 802.3 است. چندین درگاه/پیوند فیزیکی را در یک سوئیچ / روتر در یک درگاه/پیوند منطقی ادغام می‌کند تا رشد تصاعدی در سرعت پیوند را با افزایش تقاضای ترافیک خارج از محدودیت‌های هر پورت/پیوند واحد امکان‌پذیر کند. به همین ترتیب، شبکه نوری منعطف به تابع تجمیع پهنای باند اجازه می‌دهد و از این رو می‌تواند یک مسیرنوری با طول‌موج فوق‌العاده را ایجاد کند که به طور پیوسته در دامنه نوری ادغام شده است، در نتیجه استفاده قوی از منابع طیفی را تضمین می‌کند. این ویژگی خاص در شکل ۲-۴ دیده می‌شود، که در آن سه پهنای باند نوری 40Gb/s توسط یک تسهیم تقسیم فرکانس متعامد نوری (OFDM) مالتی پلکس شده‌اند و یک ابرکانال ۱۲۰ گیگاهیت بر ثانیه را شامل می‌شود [۲۹].
- تطبیق کارآمد نرخ‌های داده چندگانه: همانطور که در شکل ۲-۴ نشان داده شده است، شبکه نوری منعطف به دلیل تخصیص طیف منعطف خود، توانایی ارائه انطباق مستقیم با کارایی طیفی نرخ بیت داده‌های مختلط را در حوزه نوری دارد. شبکه‌های نوری سنتی به طور ثابت، از دست دادن طیف نوری را به دلیل توزیع فرکانس نامتناسب برای سیگنال‌های نرخ بیت ضعیف تجربه می‌کنند.
- نرخ خط قابل انطباق: شبکه نوری منعطف این پتانسیل را دارد که نرخ خط واقعی و همچنین انبساط و انقباض همزمان در پهنای باند را با تغییر مقدار در زیر حامل‌ها و انواع مدولاسیون در خود جای دهد.
- صرفه‌جویی در مصرف انرژی: این امر با قطع کردن برخی از حامل‌های فرعی OFDM در زمانی که ترافیک ضعیف است، عملیات کم مصرف انرژی را برای کاهش مصرف منابع تسهیل می‌کند.
- مجازی‌سازی شبکه: مجازی‌سازی شبکه نوری را با اتصالات مجازی به کمک حامل‌های فرعی OFDM امکان‌پذیر می‌کند.

۲-۱-۳- اجزای شبکه نوری منعطف

از ادوات اصلی EON می‌توان به دو جزء زیر اشاره کرد [۳۰]:

- فرستنده-گیرنده متغیر با پهنای باند با قابلیت تقسیم^۱ (SBVT)
- اتصال متقاطع متغیر با پهنای باند (BV-WXC)

شکل ۲-۵ معماری EON و مولفه‌های آن را نشان می‌دهد.



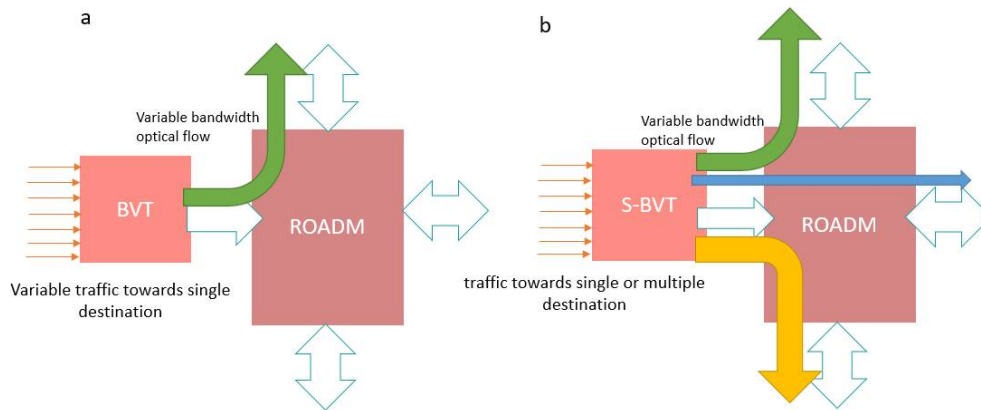
شکل ۲-۵. معماری شبکه منعطف نوری

۲-۱-۳-۱- S-BVT

BVTها می‌توانند با افزایش یا کاهش پهنای باند مسیر نوری و همچنین تنظیم فرمت مدولاسیون، میزان انتقال خود را با تقاضای ترافیک از سمت کلاینت هماهنگ کنند. با این حال اگر به دلایل مختلفی چون اختلال در مسیرنوری، S-BVT استفاده نشود آنگاه بخشی از ظرفیت آن هدر می‌رود. برای حل این مشکل از بیشینه میزان ظرفیت یک قادر است ظرفیت خود را به یک یا چند جریان نوری مستقل که به یک یا چند مقصد منتقل می‌شوند، اختصاص دهد. شکل ۲-۶ تفاوت بین BVT و S-BVT را به خوبی نشان می‌دهد.

¹ Sliceable Bandwidth Variable Transponder

دهد. بنابراین، هرگاه یک SBVT برای یک کانال با نرخ بیت پایین استفاده شود، باقی مانده ظرفیت آن می‌تواند برای انتقال یک جریان نوری مستقل دیگر استفاده شود از دید لایه‌های بالاتر SBVT می‌تواند شبیه یک BVT با ظرفیت بالا باشد و هم می‌تواند شبیه چند BVT مستقل با ظرفیت پایین باشد که این دید کاملاً به نوع کاربرد بستگی دارد. تمام این ویژگی‌ها باعث شده است تا به عنوان روشی جدید برای انجام گرومینگ نوری و همچنین استفاده بهینه از مبدل ارسال‌های موجود در شبکه، مورد توجه بسیاری در جامعه علمی قرار بگیرد. علاوه بر موارد گفته شده استفاده از S-BVT در شبکه باعث می‌شود تا از تعداد مبدل ارسال‌های کمتری استفاده شود. چرا که هر زیرحامل در یک S-BVT قابلیت این را دارد تا به مقصدهای متفاوت ارسال شود.

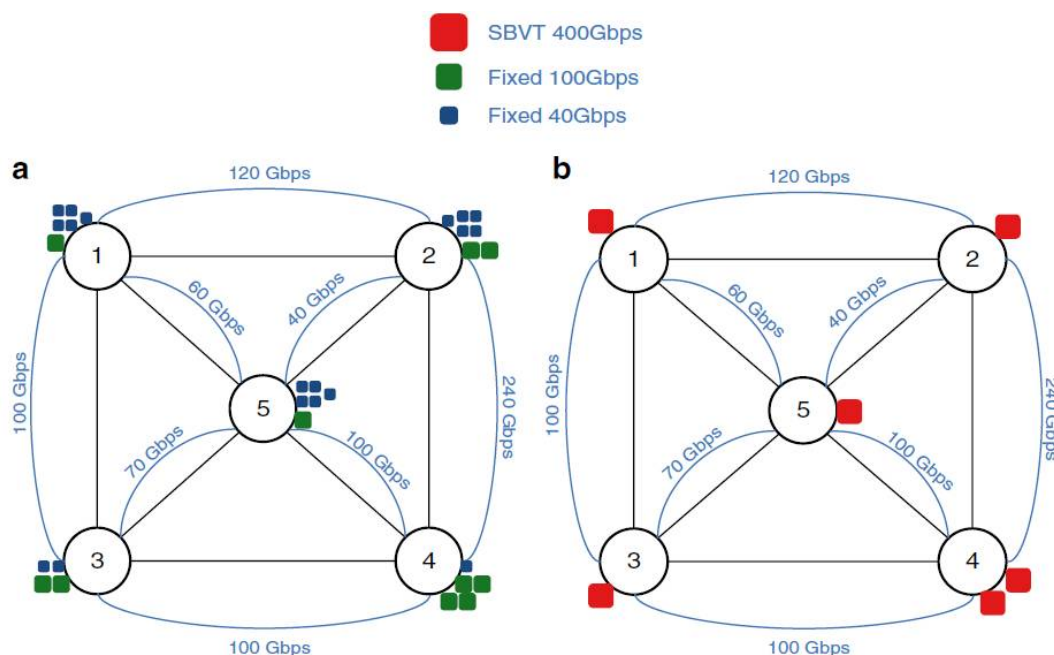


شکل ۲-۶. طراحی از الف) BVT ب) S-BVT

تعداد مقصدهایی که هر S-BVT می‌تواند پشتیبانی کند به دانه بندی آن بستگی دارد به عنوان مثال یک S-BVT با ظرفیت 400 Gb/s با حامل‌های 40 Gb/s می‌تواند تا ۴۰ مقصد ارسال داشته باشد اما با دانه‌بندی 100 Gb/s تنها تا ۴ مقصد را می‌تواند پشتیبانی کند. شکل ۲-۷ مثالی است که استفاده از دو مدل مبدل ارسال BVT و S-BVT را در شبکه مقایسه می‌کند. در این مثال فرض بر این است که هدف کاهش تعداد مبدل ارسال‌ها است [۳۱].

¹ Transponder

به عنوان مثال، در گره ۱ در حالت الف ۶ مبدل ارسال برای پاسخ به تمام درخواست‌ها لازم است به این صورت که برای ترافیک درخواستی بین گره ۱ و ۲ به سه مبدل ارسال 40 Gb/s و برای ترافیک بین گره ۱ و ۳ به یک مبدل ارسال 100 Gb/s و برای مسیر بین ۱ و ۵ به دو مبدل ارسال 40 Gb/s نیاز است. در حالی که با حفظ همین درخواست‌ها و تنها تعویض مبدل ارسال‌ها به S-BVT در گره ۱ فقط به یک مبدل ارسال نیاز است تا به تمام درخواست‌ها پاسخ دهد. گره ۴ در حالت ب به دو S-BVT نیاز دارد چرا که مجموع درخواست‌های آن نرخ برابر 440 Gb/s دارد و از ظرفیت یک S-BVT بیشتر است. همچنین در حالتی که تعداد درخواست‌ها از / به یک گره از ۱۰ تا بیشتر باشد هم به بیشتر از یکی S-BVT نیاز است. با توجه به این مثال کاملاً مشخص است که استفاده از S-BVT به جای مبدل ارسال‌های عادی BVT چه تاثیری در کاهش تعداد مبدل‌های ارسال^۱ مصرفی در شبکه و در نتیجه آن کاهش توان ادوات شبکه خواهد داشت [۳۱].



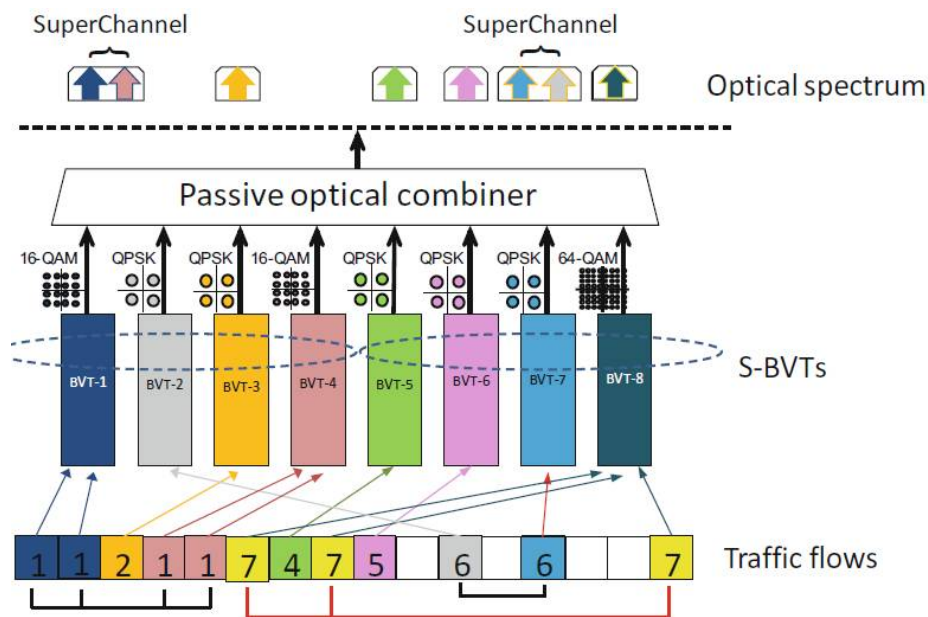
شکل ۲-۷. مثالی از تعداد مبدل‌های ارسال مورد نیاز در شبکه (الف) با استفاده از BVT (ب) با استفاده از S-BVT [۳۱]

هر S-BVT برای اینکه قابلیت اجرا داشته باشد باید بتواند الزامات زیر را برآورده کند:

^۱ Transponders

- پشتیبانی از قابلیت تقسیم: مبدل ارسال باید بتواند چندین زیرحامل تولید کند و این زیرحامل ها باید قابلیت برش یا تقسیم را داشته باشند تا هم بتوانند یک ابرکانال را شکل دهند و هم بتوانند بطور مستقل و جداگانه از یک درگاه^۱ خروجی خارج شوند.
- امکان تولید زیر حامل‌ها با فاصله قابل تنظیم: مبدل ارسال باید بتواند چندین زیرحامل تولید کند به صورتی که فاصله بین این زیرحامل‌ها قابل تنظیم باشد و بتواند متناسب با نرخ بیت و فرمت مدولاسیون تغییر کند.
- پشتیبانی از چند نرخ بیت مختلف: مبدل ارسال می‌تواند با تغییر تعداد زیرحامل‌های مورد استفاده یا تغییر نرخ بیت هر زیر حامل، قادر به پشتیبانی از مقادیر مختلف نرخ بیت باشد.
- قابلیت تطبیق با دسترسی نوری: بین میزان دسترسی نوری و بهره‌وری طیفی با توجه به قالب‌های مختلف مدولاسیون مصالحه‌ای وجود دارد به همین دلیل مبدل ارسال باید از فرمت‌های مدولاسیون مختلفی پشتیبانی کند. به عنوان مثال، هر زیرحامل ممکن است با توجه به نیازمندی‌های دسترسی نوری خود با فرمت‌هایی چون PM-QPSK یا PM-16QAM انتقال یابد. شکل ۲-۸ وجود چند فرمت مدولاسیون را در یک S-BVT نشان می‌دهد.

¹ Port



شکل ۲-۸. مثالی از یک گره با دو S-BVT و فرمت‌های مدولاسیون مختلف [۳۱]

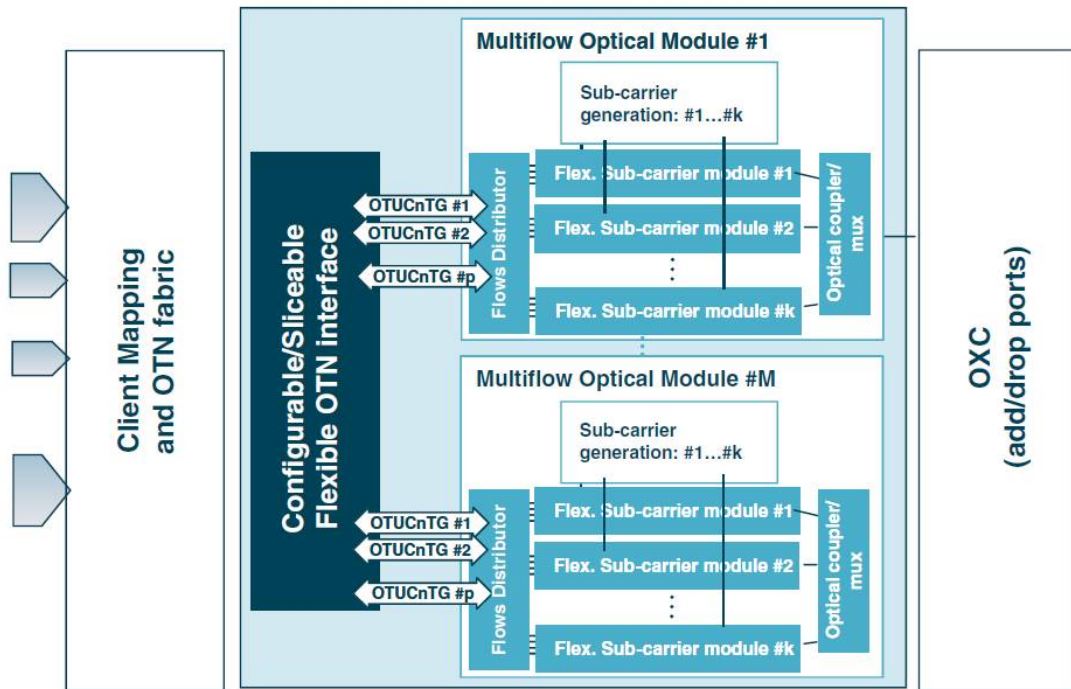
پس بطور کلی هر S-BVT می‌تواند پهنای باند و دسترسی نوری خود را با تنظیم پارامترهایی چون نرخ بیت، FEC^۱، فرمت مدولاسیون و شکل‌دهی طیف نوری میزان کند. شکل ۲-۹ معماری S-BVT را نشان می‌دهد. پهنای باند تقسیم می‌شود تا به چند ترافیک درخواستی پاسخ دهد. شبکه انتقال نوری منعطف قابل تنظیم^۲ برای تقسیم یا برش نرخ دیتاهای بالا به نرخ‌های پایین استفاده می‌شود.

۲-۳-۱-۲ BV-WXC

BV-WXC از BV-WS در گره‌ها استفاده می‌کند تا مسیری با طیف مناسب از گره مبدا به مقصد به ترافیک درخواستی اختصاص دهد. BV-WSS همانند یک مالتی‌پلکسر/دی مالتی‌پلکسر است به گونه‌ای که جریان نوری ورودی به مولفه‌های طیفی خود تجزیه شده و به خروجی متناسب با خود هدایت می‌شود.

^۱ Forward Error Correction

^۲ Configurable Flexible Optical Transport Network



شکل ۲-۹. معماری S-BVT [۳۱].

۲-۲- مجازی‌سازی برای پشتیبانی رایانش ابری

مجازی‌سازی شبکه‌های نوری موضوعی است که در سال‌های اخیر مورد توجه زیادی قرار گرفته‌است و تحقیقات زیادی تاکنون بر روی آن انجام شده‌است. چراکه این فناوری قابلیت و امکانات زیادی را برای حرکت به سمت شبکه‌های نوری و اینترنت نسل آینده فراهم می‌آورد. ازجمله این قابلیت‌ها این است که امکان وجود معماری‌ها و پروتکل‌های متفاوت بر روی زیرساخت فیزیکی را فراهم می‌کند. از نقطه نظر صنعتی نیز مجازی‌سازی شبکه منجر به جداسازی محسوس سرویس از زیرساخت شده و ارائه‌ی منابع شبکه به عنوان خدمات تجاری را تسهیل می‌کند. مفهوم مجازی‌سازی یک مفهوم جدید نیست و در گذشته هم در قالب شبکه‌های خصوصی مجازی^۱ محقق شده بود. شبکه‌های خصوصی مجازی یک تجربه‌ی موفق برای ساخت شبکه‌های مجازی جداگانه بر روی یک زیرساخت فیزیکی مشترک می‌باشد. حال سوال اینجاست که چرا با وجود شبکه‌های خصوصی مجازی نیاز به مجازی‌سازی شبکه وجود دارد. شبکه‌های خصوصی مجازی این

^۱ Virtual Private Network

هدف اولیه را برآورده می‌کند که شبکه‌های مجازی جداگانه بر روی یک زیرساخت مشترک حضور داشته باشد. ولی این نوع شبکه‌ها دارای محدودیت‌هایی می‌باشند که از آن جمله می‌توان به موارد زیر اشاره کرد [۳۲].

- تمام شبکه‌های مجازی در آن بر اساس یک فناوری و پروتکل یکسان هستند که مانع از وجود شبکه‌های متفاوت در کنار هم است.

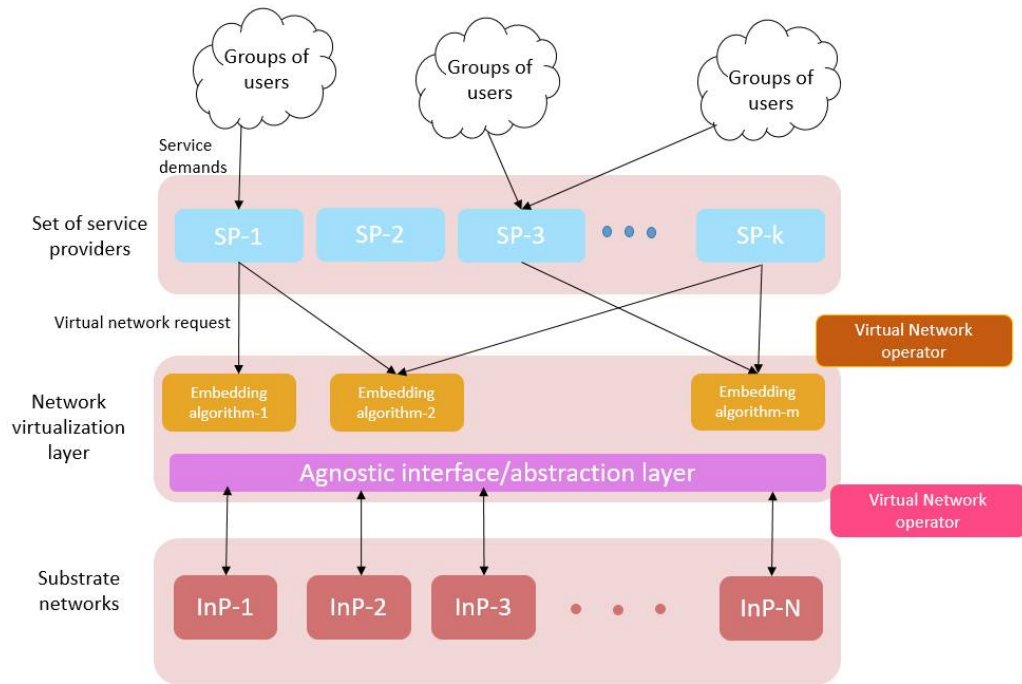
- به صورت پیش فرض، ایزولاسیون بین منابع شبکه متعلق به شبکه‌های خصوصی مجازی مختلف وجود ندارد.

- تفکیک کامل و روشنی بین ارائه‌کننده‌ی زیرساخت و ارائه‌کننده‌ی سرویس شبکه‌ی خصوصی مجازی وجود ندارد. لذا در عمل دو کار توسط یک مرجع انجام می‌شود. درحالی که مجازی‌سازی شبکه یک قدم فراتر می‌نهد و برنامه‌پذیری مستقل شبکه‌های مجازی را ممکن می‌سازد. یعنی شبکه‌های مجازی لزوماً بر مبنای یک پروتکل خاص و یک فناوری خاص نیستند.

مزیت دیگر مجازی‌سازی شبکه، قابلیت ذاتی پشتیبانی حالت چند ارائه‌کنندگی است. مجازی‌سازی شبکه باعث می‌شود جزئیات سخت افزاری شبکه‌ی زیرساخت از دید کاربر نهایی پنهان شود.

۲-۲-۱- فناوری‌های شبکه مجازی

در سال‌های اخیر، مجازی‌سازی بر استخوان‌سازی اینترنت سنتی غلبه کرده و انعطاف‌پذیری زیادی را در اشتراک‌گذاری زیرساخت‌های فیزیکی مشترک مانند منابع محاسباتی و پهنای باند انتقال ممکن می‌سازد، که به طور قابل‌توجه‌ای توسعه طیف گسترده و متنوعی از خدمات و برنامه‌های ابری را تشویق می‌کند [۳۳]. تحت مدل مجازی‌سازی شبکه، ارائه‌دهندگان خدمات اینترنتی (ISP) را می‌توان به دو نهاد یعنی ارائه‌دهندگان زیرساخت (InPs) و ارائه‌دهندگان خدمات (SPs) جدا کرد.

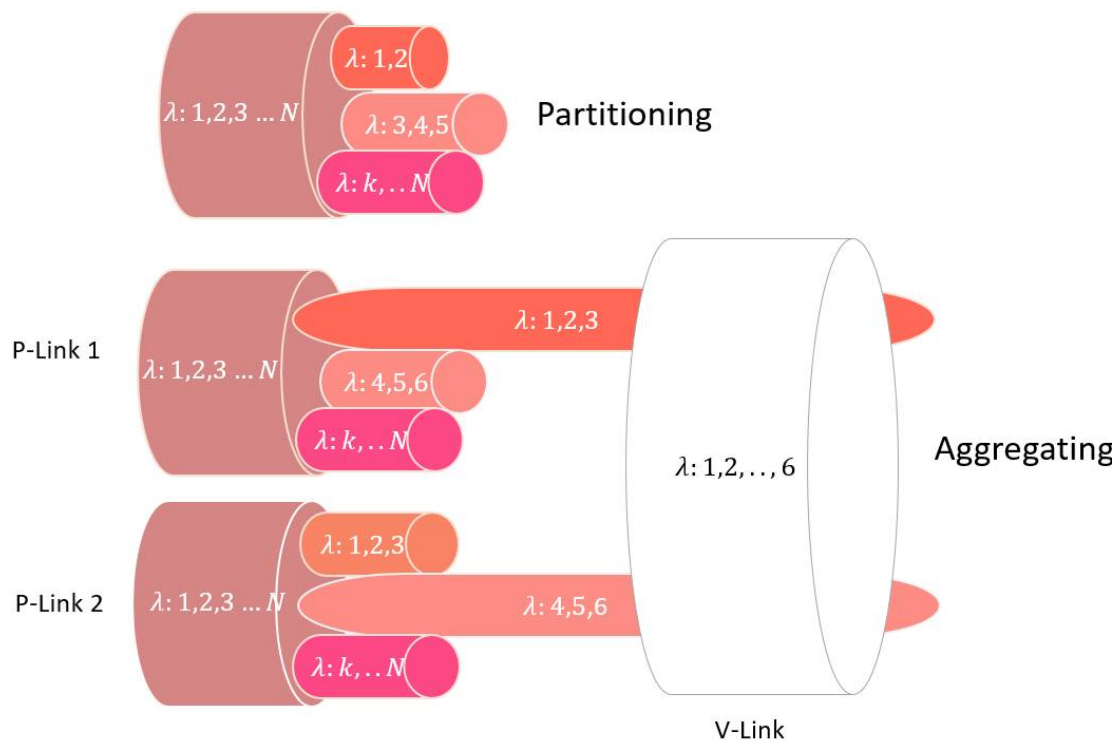


شکل ۱۰-۲. مجازی‌سازی شبکه

همانطور که در شکل ۱۰-۲ نشان داده شده است، InP مسئول استقرار و مدیریت زیرساخت شبکه فیزیکی است، در حالی که SP می‌تواند این منابع شبکه بستر (SN) را از InPs برای ارائه شبکه‌های مجازی (VN) اجاره کند و به کاربران نهایی با برنامه‌های کاربردی VN ناهمگن خدمات ارائه دهد [۳۴، ۳۵].

۲-۲-۲- مفاهیم اصلی در مجازی‌سازی شبکه نوری

مجازی‌سازی شبکه دارای دو پایه اساسی است: مجازی‌سازی پیوند و مجازی‌سازی گره. مجازی‌سازی پیوند امکان انتقال چندین پیوند مجازی را بر روی یک پیوند فیزیکی مشترک فراهم می‌آورد. یک پیوند مجازی معمولاً بر اساس یک بازه‌ی زمانی و یا یک طول موج معین می‌شود. در شکل ۱۱-۲ دو نوع مجازی‌سازی پیوند شامل تقسیم پیوندها و تجمع پیوندها مشاهده می‌شود.



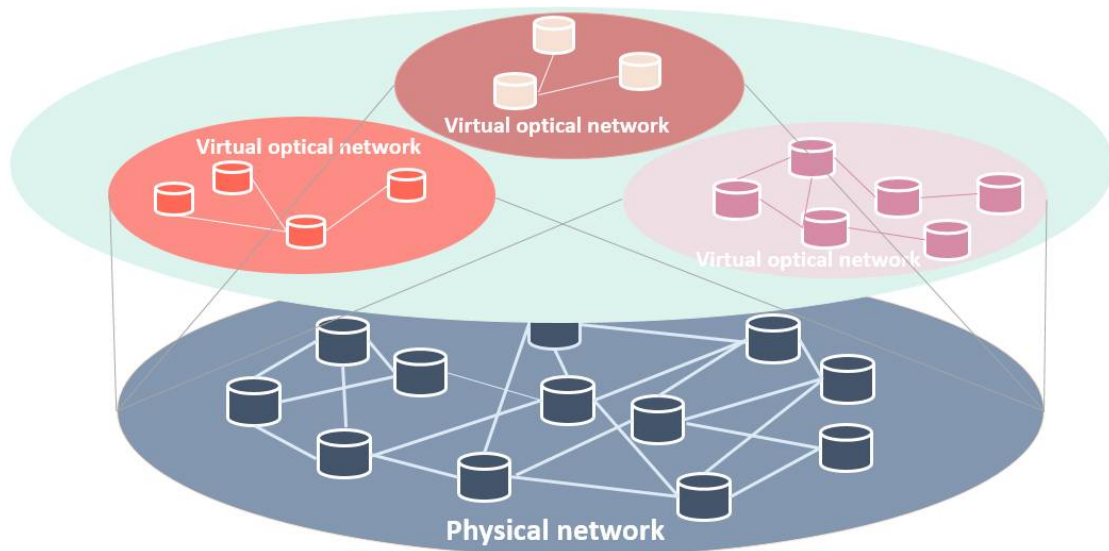
شکل ۲-۱۱. مجازی‌سازی پیوند

ساختار اساسی یک شبکه‌ی مجازی در شکل ۲-۱۲ نشان داده شده است. در این حالت یک گره زیرساخت وجود دارد که چندین گره مجازی را در خود پشتیبانی می‌کند. به عبارت دیگر یک گره زیرساخت معمولاً شامل چند گره مجازی است. مفهوم گره مجازی در برخی تعاریف، همان روتر مجازی^۱ عنوان شده است. یک روتر مجازی در تمامی زمینه‌ها از قبیل پیکربندی، مدیریت، مانیتورینگ و رفع نقص^۲ مثل یک روتر فیزیکی عمل می‌کند. هرچند که یک روتر مجازی در بسیاری از موارد یک ایزولاسیون وهمی^۳ فراهم می‌کند نه یک ایزولاسیون واقعی چراکه فاقد حافظه، پردازش و منابع ورودی خروجی به شکل اختصاصی است. مجازی‌سازی گره بر اساس ایزولاسیون و تقسیم‌بندی منابع سخت افزاری می‌باشد.

^۱ Virtual Router

^۲ Trouble Shooting

^۳ Illusion Of Virtualization

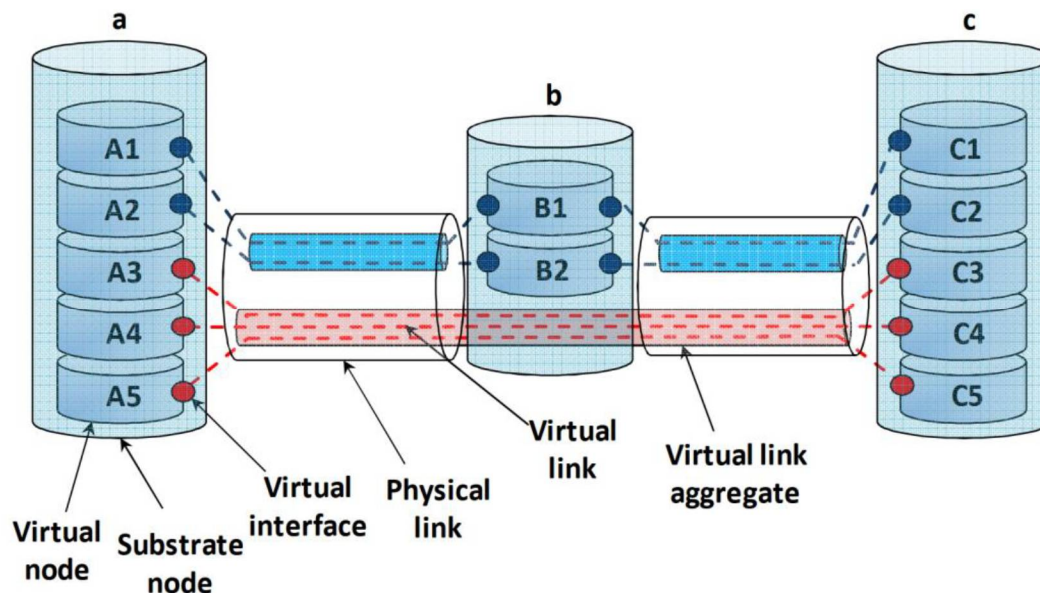


شکل ۲-۱۲. ساختار شبکه‌های مجازی

منابع فیزیکی یک گره زیرساخت شامل واحد پردازش مرکزی، حافظه، پهنای باند پیوند به تکه‌های مختلفی تقسیم می‌شوند و هر تکه به یک گره مجازی اختصاص داده می‌شود. مجازی‌سازی گره‌های زیرساخت همراه با مجازی‌سازی پیوندهایی که آن‌ها را به هم وصل می‌کنند، موجب ساخت شبکه‌های مجازی می‌شود که از نظر عملکرد معادل با شبکه‌های فیزیکی هستند. یک گره فیزیکی، یک یا چند پیوند فیزیکی را خاتمه می‌دهد که این پیوندهای فیزیکی ممکن است شامل چندین پیوند مجازی باشند. به همین ترتیب، یک گره مجازی، یک یا چند پیوند مجازی را خاتمه می‌دهد. برخی از گره‌های زیرساخت علاوه بر خاتمه دادن به پیوندهای مجازی، قادر هستند ترافیک موجود در پیوندهای مجازی را به صورت شفاف^۱ از خود عبور دهند [۳۶]. برای مثال گره b در شکل ۲ - ۱۳، که عنصرهای اصلی یک شبکه‌ی مجازی را نشان می‌دهد، این گونه است. در برخی مقالات و مراجع، گره‌های زیرساخت فیزیکی از نظر عملکرد در ۴ گروه اصلی طبقه‌بندی می‌شوند [۳۶]:

^۱ Transparent

- گره‌های لبه‌ای^۱: این گره‌ها در کناره‌های شبکه‌ی زیرساخت قرار گرفته‌اند. به طور معمول این گره‌ها به کاربران نهایی متصل هستند که این اتصال یا به طور مستقیم و یا از طریق شبکه‌ی دسترسی انجام می‌شود. یک ویژگی مهم این نوع گره‌ها، مکان جغرافیایی قرارگیری آن‌هاست.



شکل ۲-۱۳ عنصرهای اصلی یک شبکه‌ی مجازی [۳۶]

- گره‌های میانی با قابلیت مجازی‌سازی^۲: این نوع گره‌ها، مجازی‌سازی را پشتیبانی می‌کنند؛ یعنی هم می‌توانند میزبان گره‌های مجازی باشند و هم حالت غیرمجازی شده را دارا باشند. مثلاً گره b در شکل ۲-۱۳ این گونه است. این نوع گره‌ها یا به گره‌های کناری متصل هستند و یا به گره‌های میانی دیگر اتصال دارند که خود آن‌ها هم می‌توانند مجازی شده باشند یا نباشند.
- گره‌های انتقال میانی^۳: این نوع گره‌ها قابلیت مجازی‌سازی را پشتیبانی نمی‌کنند و فقط برای انتقال ترافیک بکار می‌روند.
- گره‌های مرزی^۴: این نوع گره‌ها به گره‌های مرزی مربوط به شبکه‌های دیگر متصل هستند.

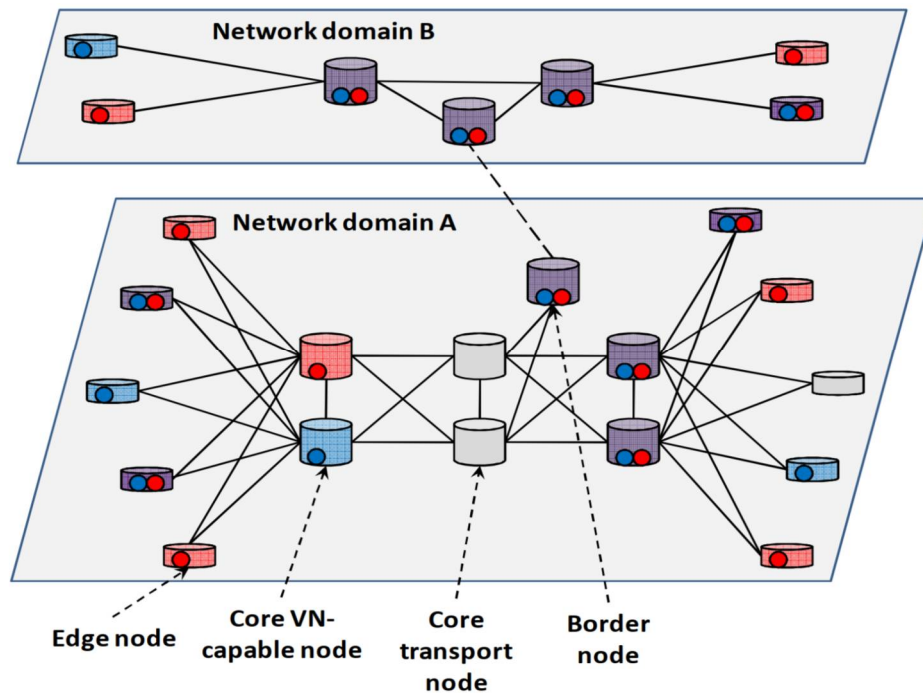
^۱ Edge Nodes

^۲ Core VN-capable Nodes

^۳ Core Transport Nodes

^۴ Border Nodes

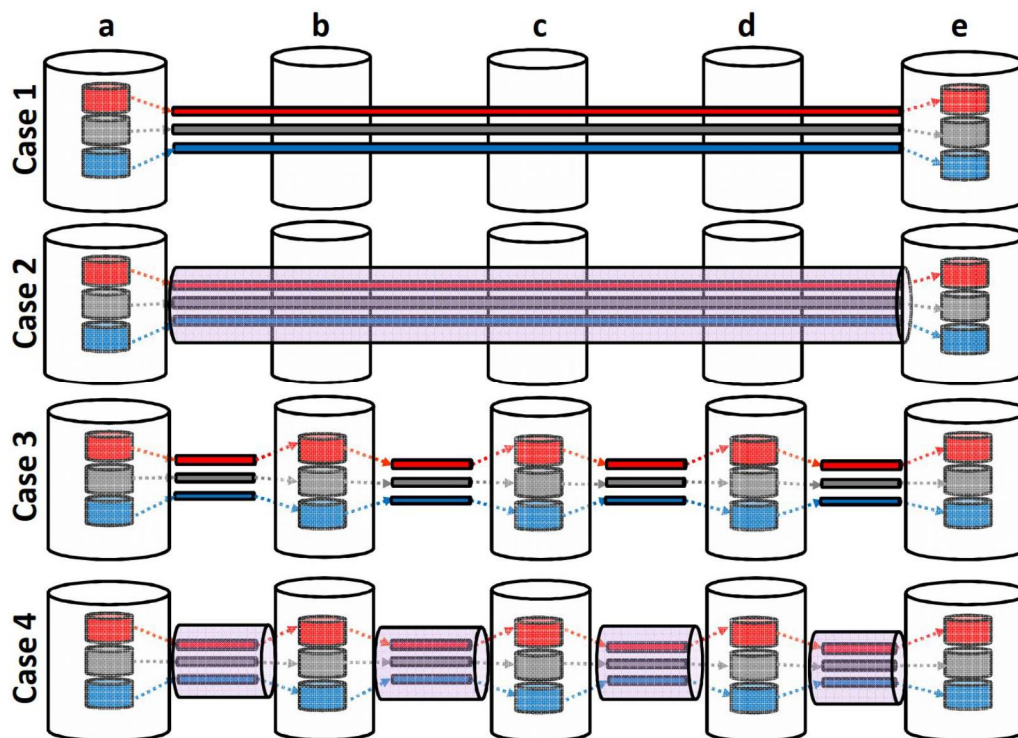
در یک شبکه‌ی نوری، یک گره خاص می‌تواند بیش از یکی از انواع ذکرشده بالا را داشته باشد. مثلاً گره b در شکل ۲-۱۳ هم از نوع گره‌های میانی با قابلیت مجازی‌سازی است و هم از نوع گره انتقال میانی است. انواع گره‌های موجود در یک شبکه‌ی نوری در شکل ۲-۱۴ نشان داده شده‌اند.



شکل ۲-۱۴. انواع گره‌های موجود در یک شبکه‌ی انتقال نوری [۳۶]

مجازی‌سازی پیوندها به دودسته تقسیم می‌شود؛ تقسیم پیوند و تجمیع پیوند. اگر یک پیوند فیزیکی را به صورت چند پیوند مجازی تقسیم کرد، حالت مجازی‌سازی توسط تقسیم پیوند را خواهید داشت و اگر چند پیوند فیزیکی به صورت یک پیوند مجازی در نظر گرفته شوند، حالت تجمیع پیوند را دارد. مزیت تجمیع پیوند این است که موجب آسان‌تر شدن کار گره‌های میانی شبکه می‌شود. چراکه به جای چندین پیوند، با یک پیوند مجازی سروکار خواهند داشت [۳۶]. در شکل ۲-۱۵ حالات مختلف تجمیع پیوندها مشاهده می‌شود.

در شکل ۲-۱۵، حالات ۱ و ۲ مربوط به تکنولوژی VPN می‌باشد که در گذشته مطرح بوده است. در این دو حالت تنها گره‌های لبه‌ای a و e، مجازی‌سازی گره را پشتیبانی می‌کنند. تجمیع پیوند مجازی که در حالت ۲ وجود دارد، باعث می‌شود که گره‌های c، b و d با یک پیوند مجازی سروکار داشته باشند. بنابراین نسبت به حالت اول، به مراتب کار راحت‌تری خواهند داشت. در حالت ۳ و ۴، تمام گره‌های زیرساخت فیزیکی، مجازی‌سازی را پشتیبانی می‌کنند. یک مزیت اقتصادی تجمیع پیوند این است که تعداد گره‌هایی که قابلیت مجازی‌سازی دارند، کمتر می‌شود. به عبارت دیگر تجمیع پیوندها وقتی مفید است که تعدادی از گره‌های میانی شبکه، فقط لازم باشد کار انتقال ترافیک را انجام دهند، نه اینکه مجازی شوند. لذا تجمیع پیوند در حالت ۳ نسبت به حالت ۴ برتری خاصی ندارد.



شکل ۲-۱۵. انواع مختلف تجمیع پیوند [۳۶]

۲-۲-۱- مهاجرت ماشین مجازی

سرورهای ابری یا مراکز داده از مجازی‌سازی برای کنترل بهینه منابع برای کاهش هزینه‌های ذخیره‌سازی ابری و تخصیص منابع استفاده می‌کنند. مجازی‌سازی با جابجایی ماشین مجازی (VM) به سرور یا دیتاسنترهای دیگر، نیازهای روزافزون شده را برآورده می‌کند. هدف مهاجرت VM دستیابی به اهداف

مدیریت منابع پیچیده مانند تعادل بار، کنترل توان، تحمل خطا و نگهداری دستگاه است. انتقال VM زنده بر روی یک شبکه گسترده (WAN) شامل انتقال وضعیت CPU، صفحات حافظه و ذخیره‌سازی دیسک از سرور مبدأ به سرور مقصد از نظر جغرافیایی دور بدون وقفه در خدمات آنلاین است که ویژگی‌های زیر را تسهیل می‌کند:

- تعادل بار: همچنین زمانی که بار به طور قابل توجهی نامتعادل است و زمان خرابی سرویس را تجربه می‌کند، به انتقال همزمان VM (ها) نیاز دارد. برای ادامه خدمات پس از خرابی اجزایی استفاده می‌شود که به طور مداوم نظارت می‌شوند و سپس بر روی میزبان^۱ توزیع شده به میزبان‌های دیگر بارگذاری می‌شوند و دیگر ترافیک به آن میزبان ارسال نمی‌شود.
- تحمل خطا پیشگیرانه: خطا چالش دیگری برای تضمین در دسترس بودن و قابلیت اطمینان خدمات حیاتی است. برای به حداقل رساندن تأثیرات خرابی بر اجرای برنامه و عملکرد سیستم، خرابی‌ها باید پیش‌بینی شده و به‌طور فعالانه رسیدگی شود. برای این کار انواع مختلفی از تکنیک‌های تحمل خطا استفاده می‌شود.
- مدیریت انرژی: بسته به نیاز منابع، سرور حالت بیکار را به حالت خواب یا خاموش تغییر می‌دهد، که در نتیجه صرفه جویی قابل توجهی در مصرف انرژی می‌شود زیرا سرور حالت بیکار از ۷۰ درصد از بیشینه توان خود استفاده می‌کند، بنابراین یکپارچه سازی VM عامل به میزبان‌های فعال کمتر، به ذخیره انرژی کمک می‌کند.
- اشتراک منابع: به اشتراک گذاری منابع سخت افزاری موجود مانند حافظه، حافظه پنهان و چرخه‌های پردازنده به بدتر شدن خروجی برنامه کمک می‌کند. جابجایی ماشین‌های مجازی از سرورهای بارگذاری شده به سرورهای کم بار این مشکل را حل می‌کند. در حالی که به اشتراک گذاری منابع به کاهش هزینه‌های جاری به دلیل خاموش کردن سرورهای اضافی یا غیرفعال کمک می‌کند.

¹ Host

- نگهداری سیستم آنلاین: یک شبکه خاص که نیاز به بروزرسانی و نگهداری دارد، سپس تمام ماشین‌های مجازی سرور خاص باید به یک سایت پشتیبانی و عملیات جایگزین منتقل شوند که مصرف‌کنندگان بتوانند بدون وقفه به آن دسترسی پیدا کنند.

۲-۲-۳ ویژگی‌های مهم در طراحی شبکه‌های مجازی

بحث طراحی شبکه‌های مجازی و نگاشت آن‌ها بر روی یک زیرساخت فیزیکی مشترک می‌تواند به صورت چند ویژگی بارز و اساسی مطرح شود. از ویژگی‌های مهم طراحی شبکه‌های مجازی می‌توان جهت ارزیابی قابلیت‌ها و توانایی‌های الگوهای مختلف طراحی شبکه استفاده کرد. در ادامه برخی ویژگی‌های اساسی در طراحی شبکه‌های مجازی مورد بحث قرار می‌گیرد [۳۶].

- پایداری^۱: شبکه باید در هنگام خرابی^۲ مربوط به گره‌ها یا پیوندها بتواند به کار خود ادامه بدهد.
- مدیریت پذیری: ارائه‌کننده‌ی زیرساخت باید نسبت به توپولوژی فیزیکی شبکه، حالت کاری شبکه، وضعیت منابع شبکه و پارامترهای دخیل دیگر در وضعیت شبکه آگاهی داشته باشد.
- کنترل ترافیک و وضعیت منابع شبکه: مهندسی ترافیک و تکنیک‌های مدیریت ترافیک که ارائه‌کننده‌ی زیرساخت انجام می‌دهد، نباید در کار شبکه مجازی خللی ایجاد کند.
- ایزولاسیون: در طراحی شبکه‌ی مجازی باید سازوکارهایی در نظر گرفته شود تا ایزولاسیون کامل بین شبکه‌های مجازی مختلف ایجاد شود. یعنی باید ترتیبی اتخاذ شود که هرگونه تغییری که در یک شبکه‌ی مجازی، چه عمدی و چه ناخواسته، به وجود می‌آید، در عملکرد شبکه‌های مجازی دیگری که از منابع فیزیکی و مشترک با آن استفاده می‌کنند، مشکلی ایجاد نشود.

^۱ Robustness

^۲ Failure

- گسترش پذیری^۱: یکی از مواردی که در به کارگیری تکنیک‌های مختلف مجازی‌سازی شبکه‌های نوری باید منظور گردد، این است که این فن‌ها بتوانند گسترش شبکه را نیز پشتیبانی نمایند. در حالت گسترش شبکه، باید کماکان ایزولاسیون بین شبکه‌های مجازی حفظ شود.
- همکاری بین‌دامنه‌ای^۲: در حالتی که شبکه‌های مجازی بر روی شبکه‌های زیرساخت چند ارائه‌کننده‌ی زیرساخت ساخته می‌شوند، باید توانایی عملکرد یکپارچه و هماهنگ باهم وجود داشته باشد. به این موضوع، خاصیت نامتجانس بودن هم اطلاق می‌شود، بدین معنی که علاوه بر امکان حضور زیرساخت‌های فیزیکی متفاوت (اعم از نوری، بیسیم، سنسور و غیره)، باید امکان کارکرد هم زمان شبکه‌های مجازی با فناوری‌ها، پروتکل‌ها و الگوریتم‌های مختلف در کنار هم وجود داشته باشد.
- قابلیت تأمین منابع برحسب تقاضا^۳: در طراحی شبکه‌های مجازی باید امکان ساخت، تغییر و حذف شبکه‌های مجازی به صورت دینامیکی برحسب نیاز وجود داشته باشد و این تغییرات باید دارای کمترین تأثیر بر روی شبکه‌های مجازی دیگر باشد.
- انعطاف پذیری: در مجازی‌سازی شبکه، باید انعطاف پذیری کافی وجود داشته باشد. به این معنی که هر ارائه‌کننده‌ی سرویس مجازی باید این امکان را داشته باشد که توپولوژی موردنظر، مسیر دلخواه ترافیک و مکانیسم‌های کنترلی موردنظر خود را به صورت مستقل از زیرساخت فیزیکی و مستقل از شبکه‌های مجازی دیگر داشته باشد. بنابراین طراحی شبکه‌ی مجازی نباید متکی و وابسته به فناوری خاصی از شبکه‌ها باشد و باید امکان به کارگیری فناوری‌ای مختلف مربوط به زیرساخت‌های متفاوت وجود داشته باشد [۳۴].

¹ Scalability

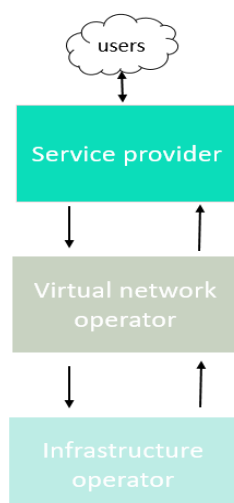
² Inter-domain Interoperability

³ On-demand Provisioning

۲-۲-۴- مدل تجاری

امروزه، بسیاری از ارائه دهندگان ابری زیرساخت به عنوان یک سرویس را برای مشتریان خود ارائه می‌دهند. فیش و همکاران یک مدل کسب‌وکار اینترنتی آینده‌نگر [۹] ارائه کردند که در آن نقش‌های مدیریت تجاری و شبکه برای عملکرد مؤثر سرویس از هم جدا می‌شوند.

شکل ۲-۱۶ یک مدل تجاری ساده با اپراتور زیرساخت، اپراتور شبکه مجازی و ارائه دهنده خدمات را نشان می‌دهد. اپراتور زیرساخت تجهیزات شبکه را مدیریت می‌کند و از عملکرد صحیح شبکه بستر اطمینان می‌دهد. ارائه دهنده خدمات به درخواست‌های شبکه مجازی کاربر پاسخ می‌دهد و مسئولیت تعامل با کاربر را بر عهده دارد. ارائه دهنده خدمات درخواست‌های شبکه مجازی را به اپراتور شبکه مجازی که تعبیه شبکه مجازی را انجام می‌دهد ارسال می‌کند. اپراتور شبکه مجازی مسئولیت ایجاد و راه اندازی شبکه های مجازی در شبکه بستر را بر عهده دارد.



شکل ۲-۱۶ مدل تجاری

۲-۲-۵- تعبیه شبکه مجازی

تعبیه شبکه مجازی (VNE) به فرآیند رسیدگی به درخواست‌های شبکه مجازی و ایجاد شبکه‌های مجازی مربوطه در شبکه بستر اشاره دارد. درخواست‌های شبکه مجازی توسط مشتری یا کاربرانی که می‌خواهند از شبکه مجازی در زیرساخت فیزیکی اپراتور استفاده کنند ارائه می‌شود. درخواست‌های شبکه مجازی شامل

تقاضای ظرفیت CPU برای گره‌های شبکه و تقاضای ظرفیت پهنای باند برای پیوندهای شبکه است که نشان‌دهنده محدودیت‌های QoS است. اطلاعات اضافی مانند مدت زمان میزبانی شبکه مجازی، توپولوژی شبکه مجازی، اولویت یا محدودیت‌های امنیتی نیز ممکن است ارائه شود. اپراتور شبکه مجازی بر اساس درخواست، وظیفه تعبیه شبکه مجازی را بر عهده دارد. نگاشت شامل ایجاد یک شبکه مجازی روی شبکه بستر است. ایجاد شبکه مجازی با ایجاد نمونه‌های مجازی از گره‌های شبکه و پیوندهای شبکه حاصل می‌شود. گره‌های مجازی با ایجاد ماشین‌های مجازی روی گره‌های بستر و پیوندهای مجازی با ایجاد ارتباطات شبکه مجازی بین گره‌های مجازی در مسیرهای بستر تحقق می‌یابند.

VNE بسته به نیازهای ظرفیت شبکه مجازی و منابع موجود در شبکه بستر می‌تواند موفقیت یا شکست باشد. معمولاً یک فرآیند دو مرحله‌ای است که شامل نگاشت گره مجازی و نگاشت پیوند مجازی است. تعبیه گره مجازی شامل ایجاد گره‌های مجازی (نمونه‌های ماشین مجازی) روی گره‌های بستر و پیوند مجازی است، نگاشت، شامل تعیین بهترین مسیرهای ممکن (پیوندهای مجازی) بین ماشین‌های بستر میزبان گره‌های مجازی است. هر دوی این مراحل، تقاضای ظرفیت CPU گره مجازی و تقاضای ظرفیت پهنای باند پیوند مجازی را در نظر می‌گیرند. در اصل، اپراتور شبکه مجازی هر گره مجازی را به یک گره بستر و هر پیوند مجازی را به یک مسیر بستر نگاشت می‌کند. شکل ۲-۱۷ نمونه‌ای از تعبیه دو شبکه مجازی در یک شبکه بستر را نشان می‌دهد. درخواست شبکه مجازی گره و درخواست پیوند هر گره مجازی و پیوند مجازی در شبکه مجازی را مشخص می‌کند.

نوری منعطف که می‌توان با طرح‌های تخصیص و مدیریت درست پهنای باند تا حد امکان این مسئله را حل کرد [۳۷].

۲-۳-۱- تأثیر تکه‌تکه شدن بر سیاست‌های تخصیص طیف

این بخش عمده سیاست‌های تخصیص طیف مرسوم را مورد بحث قرار می‌دهد که عبارتند از: اولین تناسب، تناسب تصادفی، آخرین تناسب، اولین آخرین تناسب، کمترین استفاده، بیشترین استفاده، تناسب دقیق و تأثیر تکه‌تکه شدن در هنگام استفاده شبکه از این سیاست‌های تخصیص طیف را مورد بررسی قرار می‌دهد. ما فرض می‌کنیم که درخواست‌های مسیرنوری به ترتیب به سیستم می‌رسند و اگر پیوند یکسانی داشته باشند یک به یک استقرار پیدا می‌کنند. در صورتی که هیچ پیوند مشترکی وجود نداشته باشد، می‌توان بیش از یک درخواست را به صورت موازی ایجاد کرد. برای ارزیابی اثر تکه‌تکه شدن، از معیار نسبت شکاف موجود به دلیل سادگی استفاده می‌شود.

- اولین سیاست تخصیص طیف: تمام شکاف‌های طیف را فهرست‌بندی می‌کند و لیستی از شاخص‌های مربوط به آن‌ها را نگهداری می‌کند. برای هر تخصیص، سعی می‌شود کمترین شاخص شکاف موجود در لیست را انتخاب کرده و از آن برای استقرار مسیرنوری استفاده کند. هنگامی که مسیر نور آزاد می‌شود، شکاف‌های مورد استفاده به لیست شکاف‌های آزاد شده اضافه می‌شوند. با انتخاب طیف به این روش، مسیرهای نور در شکاف طیف کمتری جمع می‌شوند، که به افزایش نسبت شکاف‌های موجود در شبکه کمک می‌کند. استفاده از این خط سیاست به هیچ گونه اطلاعات جامعی از شبکه نیاز ندارد. این سیاست برای تخصیص طیف مناسب شناخته شده است این امر به این دلیل است که نسبت شکاف در دسترس تراز وسط را فراهم می‌کند و پیچیدگی زمان محاسبه آن کم است.
- سیاست تناسب تصادفی لیستی از شکاف‌های طیف آزاد را نگهداری می‌کند. هنگامی که یک درخواست مسیرنوری به شبکه می‌رسد، سیاست تخصیص طیف به طور خودسرانه یک شکاف طیف آزاد را انتخاب می‌کند و از آن برای استقرار مسیرنوری استفاده می‌کند. پس از تخصیص شکاف‌ها،

لیست شکاف‌های آزاد با حذف شدن شکاف‌های تازه تخصیص شده دوباره به لیست برمی‌گردد. هنگامی که یک مسیرنوری آزاد می‌شود، شکاف‌هایی که تخصیص پیدا کرده بوده‌اند به لیست شکاف‌های آزاد اضافه می‌شود. با انتخاب شکاف‌های طیف به صورت تصادفی، اپراتور شبکه سعی می‌کند احتمال استفاده از برخی از شکاف‌های طیف خاص را که اغلباً استفاده می‌شود را کاهش دهد. در این حالت، شکاف‌های طیف اختصاص داده شده به طور یکنواخت در کل طیف‌ها توزیع می‌شوند.

- سیاست آخرین تناسب همواره سعی می‌کند بالاترین شاخص شکاف آزاد را انتخاب کرده و از آن برای استقرار مسیرنوری استفاده کند. هنگامی که مسیرنوری آزاد می‌شود، شکاف به لیست شکاف‌های آزاد اضافه می‌شود. سیاست تخصیص طیف آخرین تناسب با پیچیدگی محاسباتی سیاست تخصیص طیف اولین تناسب برابر است. این سیاست برای سیستم‌های انتقال که جبران پراکندگی از جمله پردازش سیگنال دیجیتال را اتخاذ نمی‌کنند، مناسب نیست. اگر جبران پراکندگی در نظر گرفته نشود، اثر پراکندگی کلی یک مسیرنوری با استفاده از آخرین تناسب بیشتر از استفاده از اولین تناسب است. این به این دلیل است که با افزایش محدوده طول‌موج، اثر پراکندگی افزایش می‌یابد. برای غلبه بر مشکل آخرین تناسب، نویسندگان [۳۸] در این مورد نشان می‌دهد که درخواست‌های مسیرنوری طولانی‌تر باید از کوچکترین شاخص شکاف طیف، جایی که اثر پراکندگی کمتر است استقرار پیدا کنند و درخواست‌های مسیر کوتاه‌تر از بزرگترین شاخص شکاف طیف اختصاص داده شوند جایی که اثر پراکندگی بیشتر است.

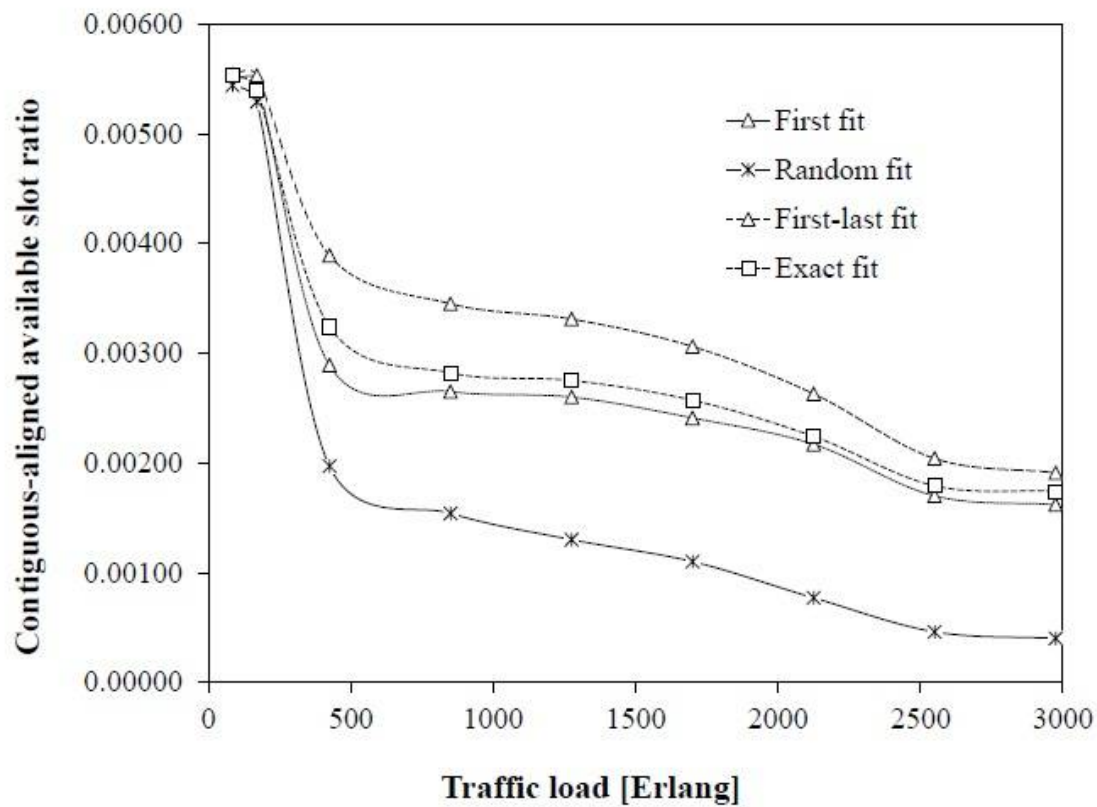
- اولین-آخرین تناسب ترکیبی از سیاست‌های تخصیص طیف اولین تناسب و آخرین تناسب است. درخواست‌های مسیرنوری در شبکه به دو گروه تقسیم می‌شوند. یک گروه از سیاست تخصیص اولین تناسب استفاده می‌کند و گروه دیگر از سیاست تخصیص طیف آخرین تناسب استفاده می‌کند. فرمول‌بندی گروهی می‌تواند به روش‌های مختلفی انجام شود. درخواست‌های مسیرنوری می‌تواند بر اساس مسیرهای ناپیوسته و جدا از هم گروه‌بندی می‌شوند. مسیرهای نوری با مسیرهای جدا از هم

با استفاده از اولین سیاست تخصیص تناسب اختصاص داده می‌شوند، در حالی که مسیرهای نوری با مسیرهای غیرجدا با استفاده از آخرین تناسب اختصاص داده می‌شوند. هدف این سیاست جلوگیری از تکه‌تکه شدن طیف در شبکه است. عملکرد این سیاست عمدتاً بستگی به نحوه تشکیل گروه‌های مسیر نور دارد. اگر گروه‌های مسیر نور به درستی شکل نگرفته باشند، عملکرد آن تضعیف می‌شود در بخش بعدی بیشتر به این سیاست تخصیص طیف پرداخته خواهد شد [۳۷].

- کمترین استفاده شده: اگر چندین نامزد شکاف طیف به یک اندازه امکان‌پذیر است، سیاست تخصیص طیف اولین تناسب برای انتخاب بهترین نامزد استفاده می‌شود. با انتخاب شکاف‌های طیف به این ترتیب سعی می‌شود بار به طور یکنواخت در سراسر دامنه طیف توزیع شود. اگر چندین کاندید شکاف طیفی با یک احتمال امکان‌پذیر باشد، اولین تناسب، برای انتخاب بهترین کاندید استفاده می‌شود. با انتخاب شکاف‌های طیف به این ترتیب سعی می‌شود بار به طور یکنواخت در سراسر دامنه طیف توزیع شود.

- بیشترین استفاده شده: سیاست تخصیص طیف بیشترین استفاده، مشابه سیاست تخصیص طیف کم استفاده می‌باشد. به جای انتخاب منابع طیفی که توسط کمترین تعداد پیوندهای فیبر در شبکه استفاده شده است، این سیاست تخصیص شکاف آزاد را انتخاب می‌کند، که بیشترین تعداد پیوندهای فیبر در شبکه از آن‌ها استفاده کرده است. انتخاب شکاف‌های طیف با استفاده از این سیاست تخصیص تلاشی برای افزایش استفاده مجدد از طیف در شبکه را داراست [۳۷].

- تناسب دقیق: اگر یک درخواست مسیرنوری برسد که برای استقرار پیدا کردن نیازمند c شکاف مجاور داشته باشد، سیاست تخصیص طیف تناسب دقیق می‌تواند c شکاف آزاد مجاور را از ابتدای طیف پیدا کند. اگر شکاف‌های آزاد c وجود داشته باشد که بیشتر یا کمتر از c نباشند، آن شکاف‌ها را اختصاص می‌دهد.



شکل ۲-۱۸. مقایسه سیاست‌های تخصیص طیف از نظر نسبت شکاف‌های موجود [۳۷]

در شکل ۲-۱۸ عملکرد تمامی سیاست‌های تخصیص بررسی شده برای شبکه NSFNET مقایسه شده است. همانطور که مشاهده می‌شود سیاست تناسب دقیق نه تنها عملکرد مناسبی دارد و تکه‌تکه شدن را بطور مناسبی سرکوب می‌کند بلکه نسبت به سیاست اولین-آخرین تناسب پیچیدگی زمانی کمتری دارد.

فصل ۳ - روش پیشنهادی تحقیق

۳-۱- تعریف مسئله

از آنجایی که بسیاری از مسدود کردن درخواست‌های VON به دلیل کمبود منابع پهنای باند در دسترس رخ می‌دهد [۳۹]، نحوه بهبود استفاده از پهنای باند و متعادل کردن بار ترافیک در شبکه بستر یک مسئله حیاتی است.

۳-۱-۱- شبکه بستر

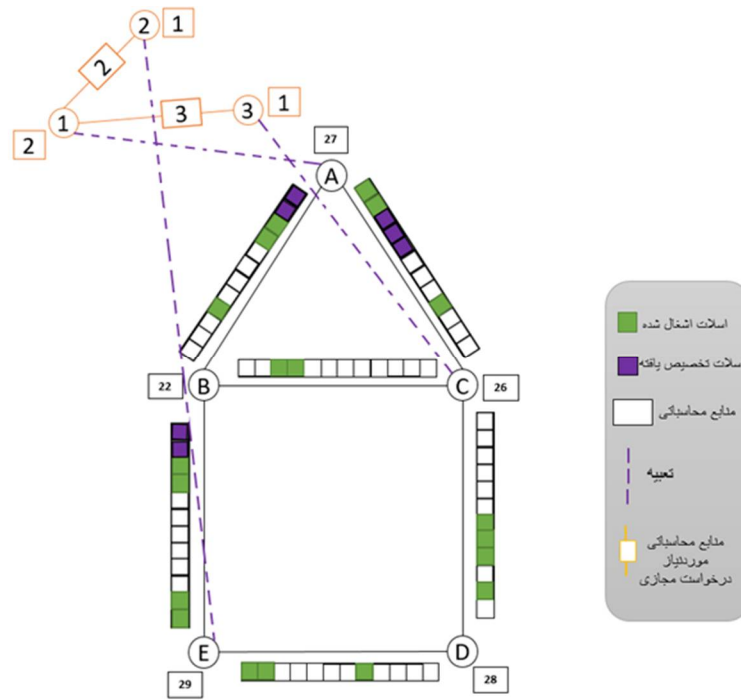
شبکه بستر به صورت یک گراف بدون جهت $G_s(N_s, L_s)$ مدل می‌شود. N_s مجموعه‌ای از گره‌های فیزیکی با منابع محاسباتی در دسترس CR_n^s است و L_s مجموعه‌ای از پیوندهای فیزیکی با منابع طیفی در دسترس BW_l^s است. برای سادگی مدل منابع، منابع طیفی به صورت شکاف فرکانسی FS^۱ در نظر گرفته می‌شوند و مجموع شکاف‌های طیفی بر روی پیوند فیزیکی می‌تواند به صورت روبه رو $N_j = \{fs_j^1, fs_j^2, \dots, fs_j^N\}$ تعریف شود.

۳-۱-۲- درخواست شبکه نوری مجازی

درخواست VON به طور مشابه می‌تواند به صورت یک گراف بدون جهت $G_v(N_v, L_v)$ مدل شود که N_v و L_v به ترتیب نشان‌دهنده مجموعه‌ای از گره‌های مجازی (VN) با منابع محاسباتی موردنیاز CR_n^v و مجموعه‌ای از VOLها با منابع طیفی موردنیاز BW_l^v است.

^۱ Frequency Slot

شکل ۱-۳ مثالی از VONE بر روی EON است که نگاشت گره و نگاشت پیوند به ترتیب $\{1 \rightarrow A, 2 \rightarrow E, 3 \rightarrow C\}$ ، $\{(1,3) \rightarrow (A,C): [(A,C)], (1,2) \rightarrow (A,E): [(A,B), (B,E)]\}$ یک مسیر نور فیزیکی در سمت راست نتیجه نگاشت پیوند ظاهر می‌شود و پیوندی که مسیر نور فیزیکی را می‌سازد در سمت چپ ظاهر می‌شود.



شکل ۱-۳. مثالی از تعبیه شبکه نوری مجازی بر روی شبکه‌های نوری منعطف

۳-۱-۳ محدودیت‌ها

VONE را می‌توان به دو زیر مسئله تقسیم کرد: تعبیه گره مجازی و تعبیه پیوند نوری مجازی. اگر و تنها اگر همه VN‌ها و VOL‌ها در یک VON با موفقیت نگاشت شوند، می‌توان گفت این درخواست VON با موفقیت نگاشت شده‌است.

۳-۱-۳-۱ نگاشت گره

$$\sum_{s \in N_s} \rho_s^v = 1 \quad \forall v \in N_v \quad (1-3)$$

$$\sum_{v \in N_v} \rho_s^v \leq 1 \quad \forall s \in N_s \quad (2-3)$$

$$CR_n^v \leq CR_n^s \quad \forall v \in N_v \quad \forall s \in N_s \quad (3-3)$$

متغیر بولین ρ_s^v اگر گره مجازی (VN) v بر روی گره مجازی (SN) s نگاشت داده شود برابر با یک خواهد بود در غیر این صورت برابر صفر است. CR_n منابع محاسباتی گره n است. معادله (۳-۱) و (۳-۲) برای اطمینان از نگاشت هر VN بر روی تنها و تنها یک گره فیزیکی هستند. معادله (۳-۳) برای اطمینان از اینکه منابع محاسباتی موجود گره‌های فیزیکی باید نیاز منابع محاسباتی VN v را برآورده کند، استفاده می‌شود.

۳-۱-۲-۳- نگاشت پیوند

$$fs_b^\beta - fs_a^\beta \geq FS_s^l - 1 \quad (3-4)$$

$$\prod_{k \in fs_a^\beta}^{fs_b^\beta} \beta_d^k = 1 \quad \forall d \in \beta \quad (3-5)$$

$$\sum_{k \in fs_a^\beta}^{fs_b^\beta} \beta_d^k \leq 0 \quad k \in [fs_a^\beta, fs_b^\beta] \quad (3-6)$$

$$\beta_{d_1}^k + \beta_{d_2}^k = 2 \quad \forall d_1, d_2 \in \beta \quad (3-7)$$

که β نشان‌دهنده مسیرنوری فیزیکی^۱ منتخب است که برای نگاشت پیوند نوری مجازی (VOL) است و همچنین d نشان‌دهنده پیوند نوری فیزیکی بر روی مسیرنوری فیزیکی β است. fs_a^β, fs_b^β به ترتیب نشان‌دهنده شاخص شروع شکاف طیفی و پایان شکاف طیفی بر روی بلوک خالی طیفی بر روی مسیرنوری فیزیکی β است. متغیر بولین β_d^k نشان‌دهنده k امین شکاف طیفی بر روی پیوند d است اگر در دسترس باشد برابر یک است در غیر این صورت صفر است. معادله (۳-۴) برای اطمینان از اینکه بلوک‌های طیفی خالی باید نیازمندی منابع طیف VOL z را برآورده کنند، استفاده می‌شود. معادله‌های (۳-۵)–(۳-۷) تضمین می‌کنند که تخصیص طیف باید از محدودیت‌های تداوم طیف، مجاورت طیف و محدودیت‌های غیر همپوشانی طیف در فرآیند VONE پیروی کند.

^۱ Physical Lightpaths

۳-۲- تابع هدف

هدف اصلی الگوریتم پیشنهادی به حداقل رساندن میانگین تعداد شکاف‌های استفاده شده در تمام پیوندهای نوری بستر در شبکه و همچنین کاهش طول مسیرهای نوری فیزیکی که به VOLها پاسخ می‌دهند، می‌باشد. برای ارزیابی هدف عنوان شده چهار معیار زیر معرفی شده است.

۳-۲-۱- تعداد متوسط بیشینه شکاف‌های استفاده شده

$$\frac{\sum_{k \in f_{s_s}} \max FS_{used_k}^s}{Nu_{slink}} \quad (۳-۸)$$

که $\sum_{k \in f_{s_s}} \max FS_{used_k}^s$ نشان‌دهنده بیشینه شاخص شکاف طیفی اشغال شده است و همچنین Nu_{slink} نشان‌دهنده تعداد تمامی پیوندها در شبکه بستر است.

۳-۲-۲- احتمال مسدود شدن پهنای باند

$$\frac{\sum_{k \in blocked} f_{s_v}^k}{\sum_{k \in total} f_{s_v}^k} \quad (۳-۹)$$

که $\sum_{k \in blocked} f_{s_v}^k$ نشان‌دهنده منابع محاسباتی طیفی درخواست‌های VON است. $\sum_{k \in total} f_{s_v}^k$ نشان‌دهنده کل نیاز منابع طیف تمام درخواست‌های VON است که باید در EON ارائه شوند.

۳-۲-۳- میانگین جهش‌های نگاشت داده شده

$$\frac{\sum_{j \in l_v} Hop_{pl}^j}{num_{vol}} \quad (۳-۱۰)$$

که $\sum_{j \in l_v} Hop_{pl}^j$ کل جهش مسیرهای نور فیزیکی را نشان می‌دهد که VOL در آنها تعبیه شده است، num_{vol} تعداد کل VOLهای وارد شده به شبکه را نشان می‌دهد.

فرمول‌های بالا محدودیت‌ها و اهداف VONE را در EON توصیف می‌کنند. با این حال، مشکل تخصیص بهینه منابع در شبکه مجازی به عنوان یک مشکل NP-hard ثابت شده است [۱۵]. اگرچه مدل ILP می‌تواند به طور موثر مشکل تعبیه شبکه نوری مجازی را حل کند، اما به دلیل پیچیدگی آن برای شبکه‌های بزرگ

مناسب نیست [۲۴]. در نتیجه، یک الگوریتم شهودی پیشنهاد شده است و در بخش بعدی الگوریتم به تفصیل معرفی خواهد شد.

۳-۲-۴ نسبت تکه تکه شدن

$$1 - \frac{\sum_{k \in f_{S_s}} f_{S_k}^v \times Nu_{vlink}}{\sum_{k \in f_{S_s}} maxFS_{used_k}^s} \quad (۳-۱۱)$$

که Nu_{vlink} نشان دهنده تعداد VOL در k امین درخواست VON است و همچنین $\sum_{k \in f_{S_s}} f_{S_k}^v$ نشان دهنده تعداد نیازمندی به منابع طیف فرکانس (FS) در k امین درخواست VON است. توسط معادله (۳-۱۱) نسبت شکاف های آزاد (یعنی شکاف های قطعه) به بیشینه شکاف های استفاده شده در تمام پیوندهای فیبر در سراسر شبکه محاسبه می شود.

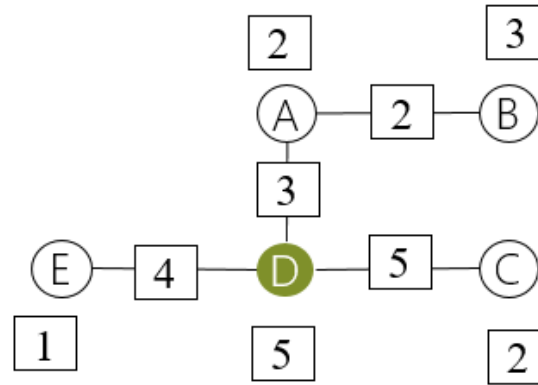
۳-۳ روش شهودی پیشنهادی

در این بخش، یک الگوریتم شهودی برای VONE پیشنهاد شده است که سیاست تخصیص طیف متناسب و تعادل ترافیک را بر اساس در دسترس بودن منابع در نظر می گیرد.

۳-۳-۱ معیار رتبه بندی گره مجازی

از آنجایی که تعبیه گره مجازی تأثیر زیادی بر تعبیه شبکه نوری مجازی دارد، VN هایی با نیازمندی به منابع محاسباتی بزرگ و نیاز به منابع طیف زیاد در VOL های مجاور خود می توانند به راحتی به گره های گلوگاه در فرآیند تعبیه تبدیل شوند. همانطور که در شکل ۳-۲ نشان داده شده است، به دلیل نیاز به منابع محاسباتی بزرگ d VN و نیاز به منابع طیف زیاد VOL های مجاور آن، احتمالاً d VN یک گره گلوگاه^۱ باشد. اگر نتوان مناسب ترین گره فیزیکی برای آن انتخاب شود، d VN ممکن است با موفقیت نگاشت داده نشود، که منجر به شکست در تعبیه VN های مجاور و VOL های مجاور آن می شود.

^۱ Bottleneck Node



شکل ۳-۲. معیار اهمیت گره

برای افزایش احتمال موفقیت نگاشت گره مجازی گلوگاه، تعیین رتبه‌بندی برای هر درخواست VON بر اساس ویژگی‌های توپولوژیکی آن، منابع محاسباتی مورد نیاز و وضعیت VN‌های تعبیه شده از قبل ضروری است زیرا هر درخواست VON دارای یک گره گلوگاه است که می‌تواند از نگاشت صحیح آن جلوگیری کند، بنابراین بر اساس رتبه‌بندی، نگاشت انجام داده می‌شود. VN‌ها را می‌توان به شرح زیر اولویت‌بندی کرد:

$$R_v(v) = CR_n^v \cdot N_{d_n}^v \cdot \sum_{link \in adj_v} fs_{link} \cdot (1 + adj_v^v) \quad (3-12)$$

که fs_{link} نشان‌دهنده تعداد شکاف‌های طیفی موردنیاز است. $N_{d_n}^v$ درجه گرهی مجازی v است و adj_v^v نشان‌دهنده تعداد گره‌های مجازی نگاشت داده شده v است. $1 + adj_v^v$ برای اجتناب از صفر شدن اتخاذ شده است. در فرآیند تعبیه، ابتدا VN با مقدار بالاتر معیار $R_v(v)$ تعبیه می‌شود.

۳-۲-۳- معیار رتبه‌بندی گره فیزیکی

به طور مشابه، از آنجایی که منابع EON محدود است، برای برآورده ساختن منابع مورد نیاز VN‌هایی که به راحتی تبدیل به گره‌های گلوگاه می‌شوند، باید آن‌ها در گره‌های فیزیکی با منابع محاسباتی کافی و منابع طیف در دسترس بزرگ در پیوندهای مجاور خود نگاشت داده شوند. علاوه بر این، هر چه درجه یک گره فیزیکی بالاتر باشد، VN‌های مجاور یک VN تعبیه شده می‌توانند بیشتر در گره‌های فیزیکی مجاور آن نگاشت داده شوند؛ چرا که هر چه طول مسیرنوری فیزیکی انتخاب شده کوتاه‌تر باشد شرط‌های همجواری و پیوستگی برای پیوندهای کمتری نیاز به ارضا شدن دارند. بنابراین بر اساس ویژگی‌های توپولوژیکی هر گره

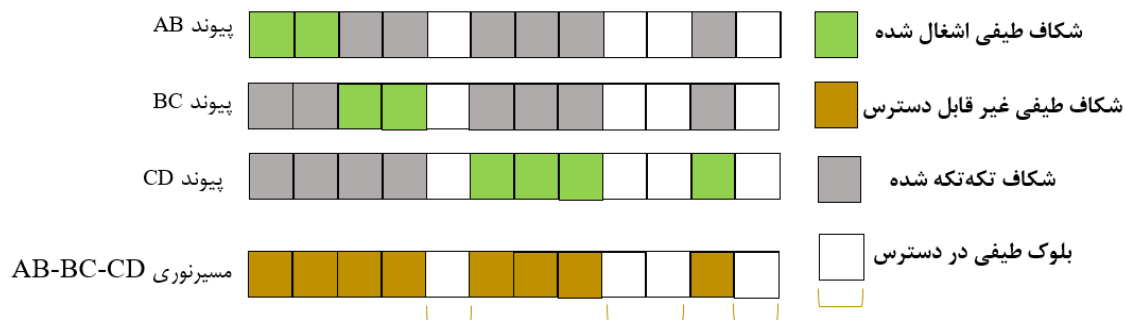
فیزیکی و شکاف‌های موجود در پیوندهای فیزیکی مجاور، می‌توان روش رتبه‌بندی را توسط فرمول (۳-۱۳) تعیین کرد. طبق این فرمول هر گره فیزیکی در یک شبکه بستر اولویت‌بندی می‌شود و بالاترین R_s آن گره‌ای است که به VN بر روی آن نگاشت می‌شود.

$$R_s(s) = CR_n^s \cdot \sum_{link \in adj_s} fsl_{link} \cdot (1 + N_{dn}^s) \quad (۳-۱۳)$$

که N_{dn}^s نشان‌دهنده درجه گره s است و CR_n^s نشان‌دهنده منابع محاسباتی در گره s است. در مرحله نگاشت گره مجازی، VN با بیشترین مقدار R_v در گره فیزیکی با بیشترین مقدار R_s تعبیه می‌شود تا احتمال نگاشت موفقیت آمیز گلوگاه VN افزایش یابد.

۳-۳-۳ معیار توازن ترافیکی

به دلیل وجود شرط‌های همجواری و پیوستگی طیف، استفاده از طیف به طرز قابل توجه‌ای کاهش می‌یابد. همانطور که در شکل ۳-۳ نشان داده می‌شود هنگامی که پیوند نوری فیزیکی AB، BC و CD مسیرنوری فیزیکی A-B-C-D تشکیل می‌دهند که تکه‌تکه‌های طیف غیرقابل دسترس در این سه پیوند ایجاد می‌شود. بنابراین، برای کاهش تولید تکه‌تکه شدن طیف در پیوندهای نوری فیزیکی به دلیل تشکیل یک مسیرنوری فیزیکی دو معادله برای ارزیابی در دسترس بودن طیف یک مسیرنوری فیزیکی اتخاذ شده است.



شکل ۳-۳. در دسترس بودن طیف یک مسیر نور فیزیکی

$$fs_i^j = fs_\beta^j = \begin{cases} 0 & \text{اگر زامین شکاف طیفی اشغال باشد} \\ 1 & \text{اگر زامین شکاف طیفی آزاد باشد} \end{cases} \quad (۱۴-۳)$$

$$U_{slot}(s, \hat{s}) = \sum_i \sum_j^N fs_i^j \oplus fs_{\beta \hat{s}}^j \quad (۱۵-۳)$$

$$bl = fs_\beta^{\beta} - fs_\alpha^{\beta} + 1 \quad (۱۶-۳)$$

که fs^i نشان‌دهنده حالت FS i است. معادله (۱۴-۳) برای محاسبه تعداد FS‌های جدید تولید شده غیرقابل دسترس در تمام پیوندهای نوری فیزیکی که مسیر نور $\beta(s, \hat{s})$ را تشکیل می‌دهند، استفاده می‌شود. bl اندازه بلوک‌های طیف خالی مسیرنوری β را نشان می‌دهد. معادله (۱۶-۳) برای محاسبه FS‌های بلوک طیف موجود در مسیر نور β استفاده می‌شود. در عین حال، در طول فرآیند تعبیه پیوند نوری مجازی، به دلیل رویکرد تعبیه هماهنگ الگوریتم پیشنهادی، باید شرایط یک مسیر نور فیزیکی و گره آن به طور مشترک در نظر گرفته شوند. بنابراین، به منظور تعبیه یک VOL به مسیرنوری با منابع طیف کافی، در دسترس و همچنین تکه‌تکه شدن کمتر، باید مطمئن حاصل شود که VN دیگری از VOL می‌تواند با منابع محاسباتی کافی و اتصال بیشتر در گره فیزیکی نگاشت شود، معادله (۱۷-۳) برای ارزیابی در دسترس بودن منابع بین دو گره فیزیکی مختلف استفاده می‌شود که \hat{s} نشان‌دهنده گره فیزیکی برای گره فیزیکی است که VN بر روی آن نگاشت می‌شود، s نشان‌دهنده گره فیزیکی است که هیچ گره مجازی از آن درخواست مجازی بر روی آن نگاشت نشده باشد.

$maxbl(\hat{s}, s)$ بیشینه اندازه بلوک خالی است. $minhop(s, \hat{s})$ نشان‌دهنده جهش میان گره فیزیکی \hat{s} و s است. $U_{slot}(s, \hat{s})$ که توسط (۱۵-۳) محاسبه می‌شود که نشان‌دهنده تعداد شکاف‌های طیفی است که به به علت شرط همجواری و پیوستگی غیر قابل دسترس هستند.

برای غلبه بر تکه‌تکه شدن، مسیرهای نور فیزیکی را بر اساس توازن ترافیکی رتبه‌بندی می‌شوند. ابتدا فرمول (۱۶-۳) اعمال می‌شود و $k + 1$ مسیرنوری کاندید می‌شود. مسیرهای نوری بر اساس تعداد شکاف‌های تکه تکه شده‌ای که ایجاد می‌کند، تعداد پیوندهایی که شامل می‌شود و ویژگی‌های توپولوژیکی گره‌ای که قرار

است به آن برسد، ارزیابی می‌شوند. در پایان، توازن ترافیک را بین $k + 1$ نامزد اعمال می‌شود، k نامزد نهایی توسط (۱۸-۳) تعیین می‌شوند. در فرآیند تعبیه پیوند نوری مجازی، مقدار TB بین دو گره فیزیکی محاسبه می‌شود، جدول ارزیابی ایجاد می‌شود که k مسیر نور فیزیکی کاندید انتخاب می‌شود.

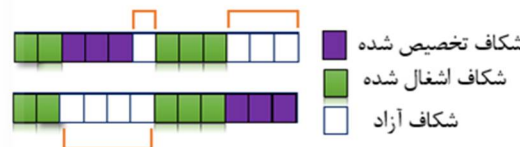
$$RAN_s^s = CR_n^s \cdot N_{deg_n^s} \cdot \frac{maxbl(s, \hat{s})}{minhop(s, \hat{s}) + (U_{slot}(s, \hat{s}))} \quad (17-3)$$

$$TB_s^s = \frac{f_{sa_s^s}}{f_{svalue}} \cdot RAN_s^s \quad (18-3)$$

که $f_{sa_s^s}$ و f_{svalue} به ترتیب نشان‌دهنده تعداد شکاف‌های موجود در هر پیوند و شکاف‌های طیفی موجود در هر مسیرنوری تشکیل شده از s به \hat{s} است.

۳-۴-۳- معیار مسیر انتخابی

هنگامی که یک VN بر روی شبکه بستر EON تعبیه می‌شود، باید از محدودیت‌های پیوستگی و همجواری طیف پیروی کند، که منجر به تکه‌تکه شدن جدی طیف و بازده طیف کمتر EON می‌شود. اعمال توازن ترافیکی برای پیوندهای کاندید می‌تواند مسیرهای نوری فیزیکی با منابع طیف مناسب و تکه‌تکه شدن طیف کمتر را برای یک VOL انتخاب کند، تعبیه پیوند نوری مجازی به طور قابل توجهی بر منابع طیف یک مسیر نور فیزیکی تأثیر می‌گذارد.



شکل ۳-۴. تفاوت سیاست تناسب دقیق و سیاست تناسب دقیق در بیشینه اندازه بلوک

با توجه به تغییرات حالت طیف قبل و بعد از تعبیه VOLها، در [۱۷] یک استراتژی مسیر اتخاذ شده است. شکل ۳-۴ نشان می‌دهد که سیاست تخصیص طیف تناسب دقیق، به دلیل تأثیر آن بر بیشینه اندازه بلوک، یک پارامتر حیاتی برای نگاشت پیوند مجازی است که تأثیر قابل توجه و غیرقابل برگشتی بر تکه‌تکه شدن

دارد. به عنوان توسعه استراتژی مسیر، روشی برای ارزیابی مسیرنوری و وضعیت شبکه قبل و بعد از تعبیه VOL با سیاست تخصیص طیف تناسب دقیق پیشنهاد شده‌است.

$$LC(s, \acute{s}) = \frac{TB_{\acute{s}}^s}{\frac{\tau_r^a}{\tau_r^b} + \frac{maxFS_{used_{\acute{s}}}^s}{fs_{value}}} \quad (۳-۱۹)$$

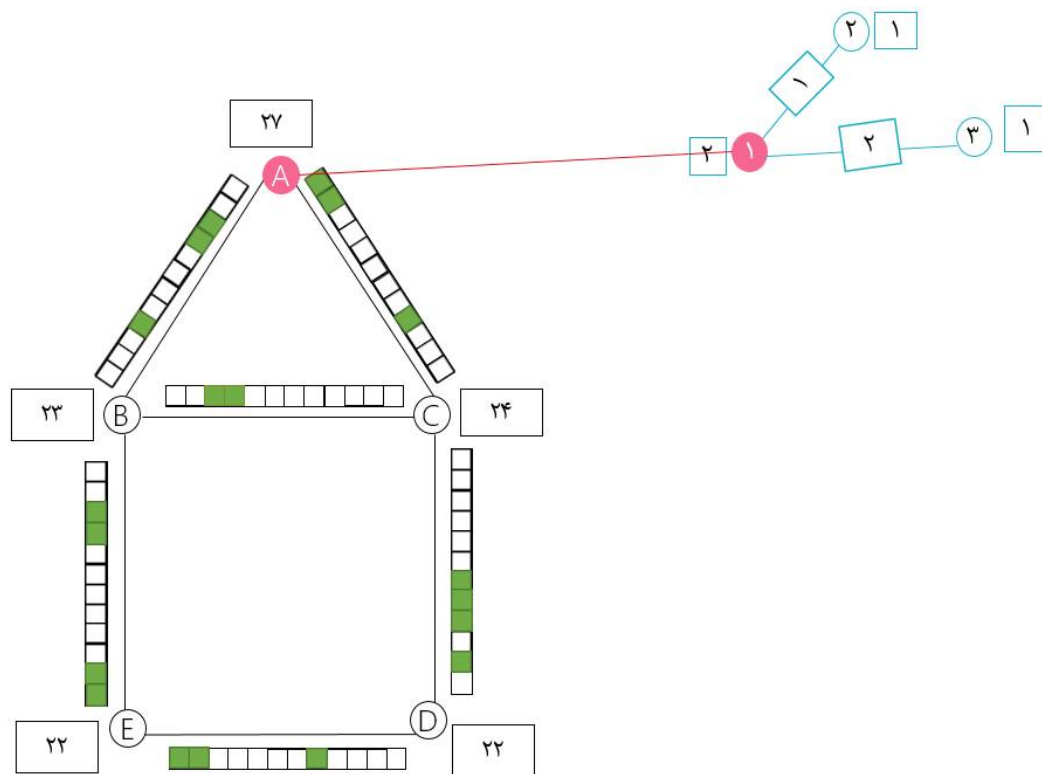
$$\tau_{\acute{s}}^s = \sum_{k=0}^{N-1} fs_{p_{\acute{s}}}^k - \sum_{k=0}^{N-1} fs_{p_{\acute{s}}}^k \oplus fs_{p_{\acute{s}}}^k \quad (۳-۲۰)$$

که τ_r^b, τ_r^a به ترتیب نشان‌دهنده بیشینه اندازه بلوکی است که بر روی مسیرنوری انتخابی که برای نگاشت VOL انتخاب شده است قبل و بعد از نگاشت بر اساس سیاست تناسب دقیق است.

بزرگتر بودن مقدار $LC_{\acute{s}}^s$ ، نه تنها نشان می‌دهد که منابع موجود بیشتری در مسیرنوری $s - \acute{s}$ وجود دارد، بلکه نشان می‌دهد که بلوک‌های طیف خالی می‌توانند به طور موثرتری استفاده شوند و FS‌های اشغال شده می‌توانند بسیار متراکم‌تر باشند. بنابراین، می‌توان منابع طیف بیشتری را برای درخواست‌های VON جدید در دسترس قرار داد تا استفاده از طیف بهبود یابد.

۳-۴- مثالی از نگاشت

فرض کنید شبکه فیزیکی با ۵ گره فیزیکی و ۶ پیوند فیزیکی وجود دارد که بعضی از منابع آن توسط درخواست‌های پیشین استفاده شده‌اند. درخواست شبکه مجازی با سه گره مجازی و دو پیوند مجازی که به طور تصادفی ایجاد شده‌است، برای نگاشت وارد شبکه می‌شود و مقدار $k = 3$ می‌باشد. برای انجام نگاشت درخواست، در ابتدا معیار رتبه‌بندی نگاشت مجازی محاسبه می‌شود. گره مجازی ۱ به عنوان گره گلوگاه مشخص می‌شود. پس از تعیین گره مجازی منتخب، معیار رتبه‌بندی گره فیزیکی اعمال می‌شود. گره فیزیکی A انتخاب می‌شود و نگاشت بر روی آن انجام گیرد.



پس از نگاشت گره مجازی و برورسانی منابع محاسباتی گره فیزیکی A، برای انجام نگاشت پیوند مجازی، پیوندهای مجازی مجاور گره ۱ بر اساس منابع طیفی موردنیاز به طور نزولی مرتب می‌شوند. در ابتدا پیوند مجازی (۱-۳) که بیشترین نیازمندی منابع طیفی را داراست برای نگاشت انتخاب می‌شود.

از گره فیزیکی که برروی آن نگاشت انجام شده است به تمامی گره‌های فیزیکی که از آن درخواست، گره مجازی‌ای برروی آن نگاشت نشده است، معیار در دسترس بودن منابع محاسبه می‌شود. پس از محاسبه مقادیر در دسترس بودن منابع، $k + 1$ مسیرنوری که بیشترین مقدار را دارند منتخب می‌شوند. برای مثال مقدار در دسترس بودن منابع برای گره فیزیکی C و مسیرنوری (A-C) در زیر محاسبه شده است.

$$RAN_C^A = CR_n^C \cdot N_{deg_n^C} \cdot \frac{maxbl(A, C)}{minhop(A, C) + (U_{slot}(A, C))} = \frac{3 \times 24 \times 6}{1 + 1} = 216$$

جدول ۲-۳. مقادیر در دسترس بودن منابع

مقدار در دسترس بودن منابع	کمترین جهش‌های فیزیکی	گره
۱۳۸	A-B	B
۲۱۶	A-C	C
۶۶	A-C-D	D
۴۶	A-B-E	E

سپس معیار توازن ترافیکی بر روی $k + 1$ مسیرنوری منتخب اعمال می‌شود. برای مثال مقدار توازن ترافیکی برای گره C در زیر محاسبه شده است.

$$TB_C^A = \frac{fs_{a_C}^A}{fs_{value}} \cdot RAN_C^A = 9/12 \times 216 = 162$$

پس از آن که مقادیر جدول ۲-۳ محاسبه شد k مسیرنوری که بیشترین مقدار توازن ترافیکی را دارند به عنوان مسیرهای نوری کاندید در نظر گرفته می‌شوند.

جدول ۲-۳. مقادیر توازن ترافیکی

مقدار توازن ترافیکی	کمترین جهش‌های فیزیکی	گره
۱۰۳,۵	A-B	B
۱۶۲	A-C	C
۳۳	A-C-D	D
۳۴,۵	A-B-E	E

برروی k مسیرنوری کاندید شده از مرحله قبل، معیار مسیر انتخابی اعمال می‌شود و جدول ۳-۳ تشکیل می‌شود.

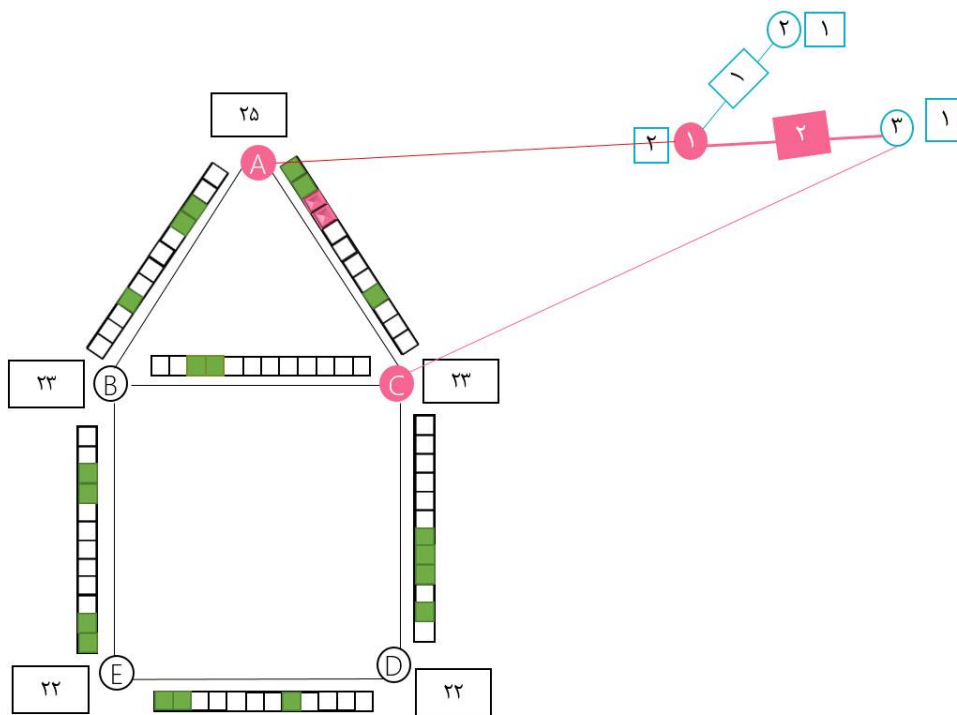
جدول ۳-۳. مقادیر مسیر انتخابی

مقدار مسیر انتخابی	کمترین جهش‌های فیزیکی	گره
۵۹,۱۴	A-B	B
۱۱۴,۷	A-C	C
۱۷,۲۵	A-B-E	E

مقدار مسیر انتخابی برای مسیرنوری (A-C) طبق رابطه زیر محاسبه شده است.

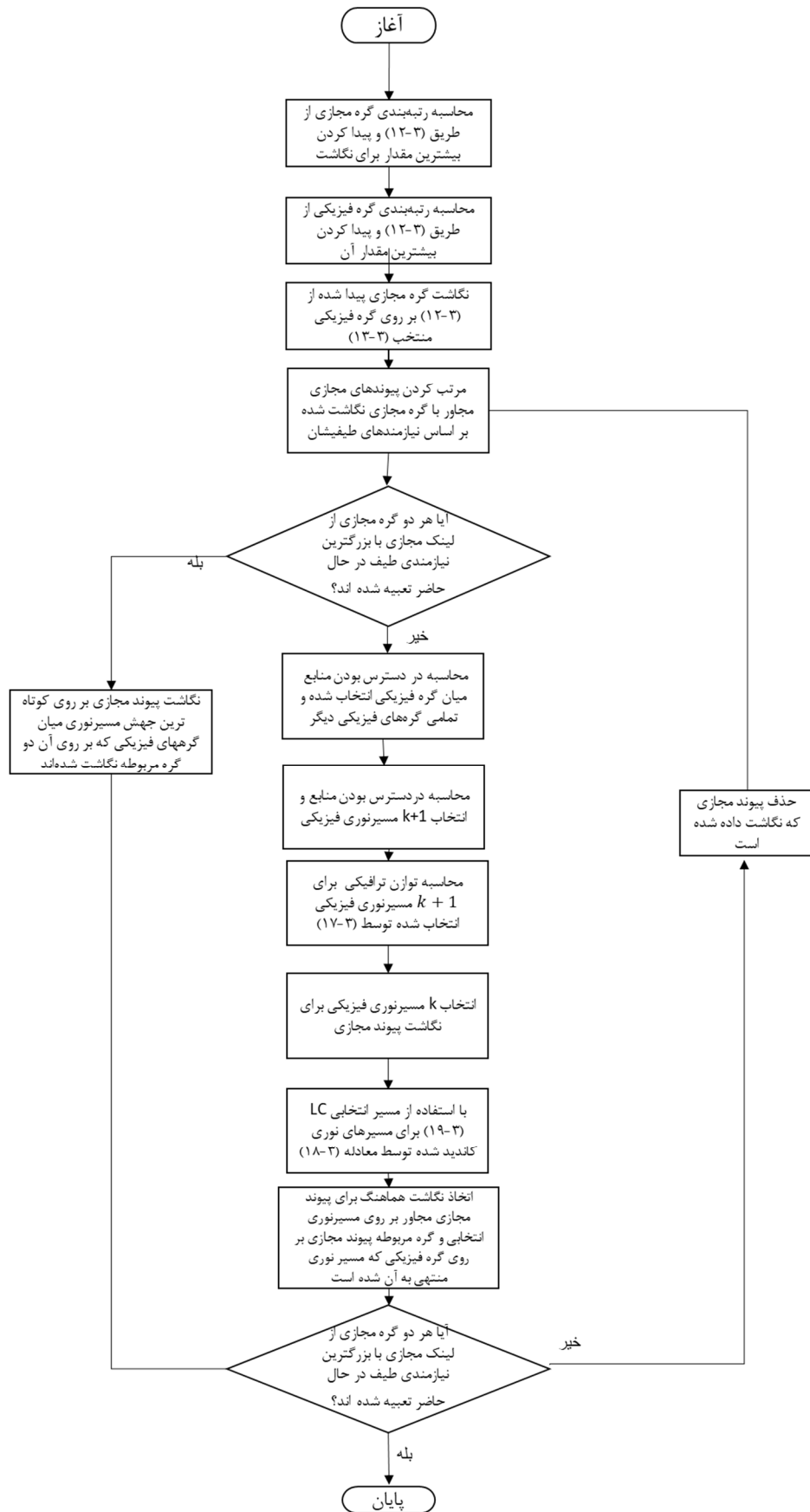
$$LC(A, C) = \frac{TB_{\xi}^s}{\frac{\tau_r^a}{\tau_r^b} + \frac{maxFS_{used_{\xi}^s}}{fs_{value}}} = \frac{162}{\frac{4}{6} + \frac{9}{12}} = 114.7$$

مسیرنوری که بیشترین مقدار مسیر انتخابی را دارد مسیرنوری می‌باشد که نگاشت پیوند مجازی بر روی آن صورت می‌گیرد. باتوجه به مقادیر جدول ۳-۳ پیوند مجازی (۱-۳) بر روی مسیرنوری فیزیکی (A-C) با استفاده از سیاست تناسب دقیق نگاشت داده می‌شود. پس از اتمام نگاشت پیوند، به علت رویکرد هماهنگ الگوریتم، گره مجازی ۳ بر روی گره فیزیکی C نگاشت داده می‌شود.



شکل ۳-۶. مرحله نگاشت پیوند بر روی مسیرنوری فیزیکی منتخب

نمودار فلوچارت الگوریتم پیشنهادی در شکل ۳-۷ نشان داده شده است.



شکل ۷-۳. فلوچارت مربوط به الگوریتم پیشنهادی

فصل ۴ - شبیه‌سازی و تحلیل نتایج

در این بخش شبیه‌سازی عددی برای ارزیابی انجام شده است به منظور اثبات بهبود و کارایی الگوریتم پیشنهادی در چهار معیار مختلف در سه شبکه متفاوت مورد بررسی قرار گرفته است: شبکه ۵ گره‌ای، شبکه ۱۴ گره‌ای DT و شبکه ۲۴ گره‌ای US. شبکه بستر EON با دانه‌بندی شبکه 12.5 GHz در نظر گرفته می‌شود و یک شکاف فرکانس (FS) می‌تواند 12.5 GHz را در زمانی که فرمت مدولاسیون BPSK است، حمل کند.

تخصیص منابع در شبکه‌های مجازی به عنوان یک مشکل NP-hard در نظر گرفته می‌شود [۳]. با وجود اینکه مدل ILP قادر است مشکل تعبیه شبکه نوری مجازی را به طور موثر حل کند، پیچیدگی زمانی روش ILP در شبکه‌های واقعی می‌تواند بسیار زیاد باشد. بنابراین در ابتدا برای ارزیابی مناسب، مدل ILP با الگوریتم پیشنهادی و محک^۱ در شبکه‌ی ساده ۵ گره‌ای در دو معیار مقایسه می‌شود. برای دستیابی به مقیاس‌پذیری، عملکرد الگوریتم پیشنهادی در دو توپولوژی شبکه واقعی بستر در دو معیار بررسی می‌شود. الگوریتم محک RA_CVONE [۱۷]، الگوریتم هماهنگی را ارائه کرده است که در ۴ مرحله، نگاشت پیوند و گره را تواما انجام می‌دهد.

در مراحل شبیه‌سازی درخواست‌های شبکه نوری مجازی به صورت کاملاً تصادفی در هر بار اجرا تولید می‌شوند و احتمال اینکه یک جفت VN مستقیماً متصل شود برابر با ۰.۵ است. پارامترهای دیگر شبیه‌سازی به

^۱ Benchmark

تفکیک توپولوژی بستر در جدول ۴-۱ آمده است. همچنین توپولوژی‌های بررسی شده در شکل ۴-۱ نشان داده شده است.

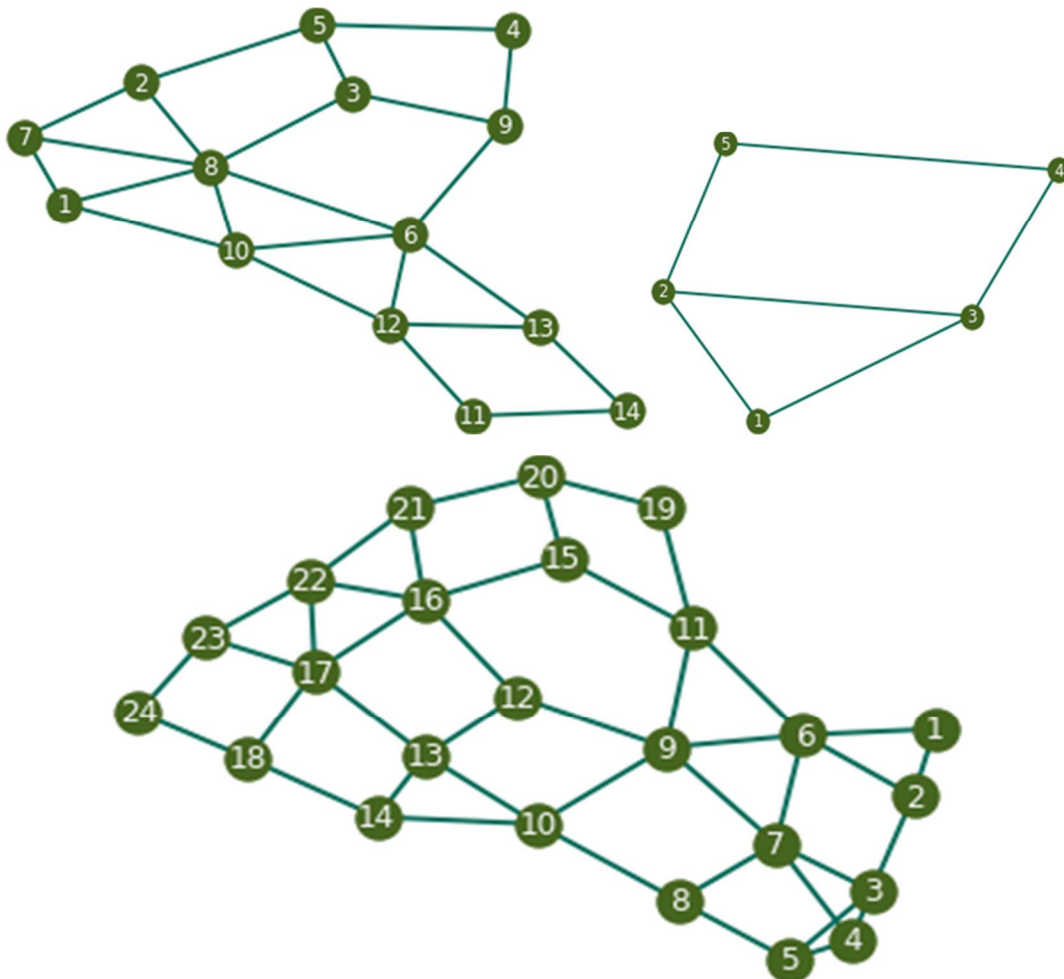
شبیه‌سازی‌ها در محیط پایتون در رایانه‌ای مجهز به پردازنده Core i ۷-HQ۴۷۱۰ با رم ۸ گیگابایتی اجرا شده‌اند. معیارهای ارزیابی:

- میانگین تعداد شکاف‌های استفاده شده: مقدار متوسط شاخص شکاف استفاده شده در تمام پیوندهای فیبر در کل شبکه.
- معیار نسبت تکه‌تکه شدن طیف: نسبت شکاف‌های آزاد (یعنی شکاف‌های تکه‌تکه شده) به بیشینه شکاف‌های استفاده شده در پیوندهای تمام فیبر در سراسر شبکه.
- احتمال مسدود شدن پهنای باند: نسبت کل نیاز منابع طیفی درخواست‌های VON مسدود شده به کل نیازمندی منابع طیفی تمام درخواست‌های VON را نشان می‌دهد که باید در EON ارائه شوند.
- میانگین جهش‌های نگاشت شده: نسبت کل جهش مسیرهای نور فیزیکی را نشان می‌دهد که VOLها در آنها تعبیه شده‌اند به تعداد کل VOLها را نشان می‌دهد.

جدول ۴-۱. پارامترهای شبیه‌سازی

توپولوژی ۵ گره	توپولوژی DT	توپولوژی US	
تعداد گره‌های فیزیکی در شبکه بستر	۵	۱۴	۲۴
تعداد پیوندهای فیزیکی در شبکه بستر	۶	۲۳	۴۳
مجموع ظرفیت محاسباتی در هر گره مجازی	۵۰ واحد	۲۰۰ واحد	۲۰۰ واحد
مجموع شکاف طیفی در هر پیوند فیزیکی	۵۰ شکاف طیفی	۳۲۰ شکاف طیفی	۳۲۰ شکاف طیفی
تعداد گره‌های مجازی در هر شبکه	[۳-۲]	[۵-۳]	[۵-۳]

توپولوژی ۵ گره	توپولوژی DT	توپولوژی US
تعداد منابع موردنیاز محاسباتی در هر گره مجازی	[۳-۱]	[۱۰-۱]
تعداد منابع موردنیاز طیفی در هر پیوند مجازی	[۳-۱]	[۱۰-۱]



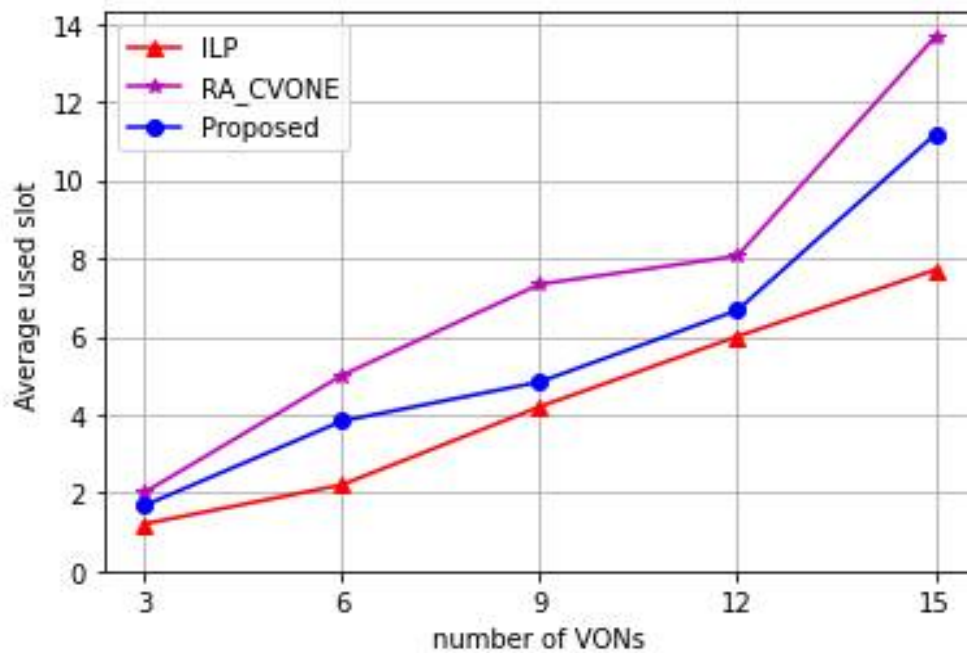
شکل ۴-۱. توپولوژی های شبکه بستر (الف) توپولوژی پنج گره. (ب) توپولوژی ۱۴ گره DT. (ج) توپولوژی ایالات متحده ۲۴ گره.

۴-۱- مقایسه الگوریتم پیشنهادی و مدل ریاضی

با توجه به پیچیدگی محاسباتی ILP، نتایج شبیه‌سازی مدل ILP پیشنهادی را با الگوریتم پیشنهادی و محک در یک توپولوژی ساده پنج گره در دو معیار میانگین تعداد شکاف‌های استفاده شده و معیار نسبت تکه‌تکه شدن طیف مقایسه می‌شود.

الگوریتم RA_CVONE ارائه شده در [۱۷]، وضعیت نگاشت یک VN را با معرفی معیار اهمیت گره در نظر می‌گیرد و با توجه به هدف مقاله سعی در کاهش طول مسیرنوری دارد. در این جهت با معرفی دو معیار در دسترس بودن منابع و استراتژی مسیر نگاشت پیوند را با بهره‌گیری از سیاست تخصیص طیف اولین تناسب انجام می‌دهد. در هر شکل، هر نقطه داده در نمودارها در طول شبیه‌سازی ۱۰ بار به طور میانگین محاسبه می‌شود.

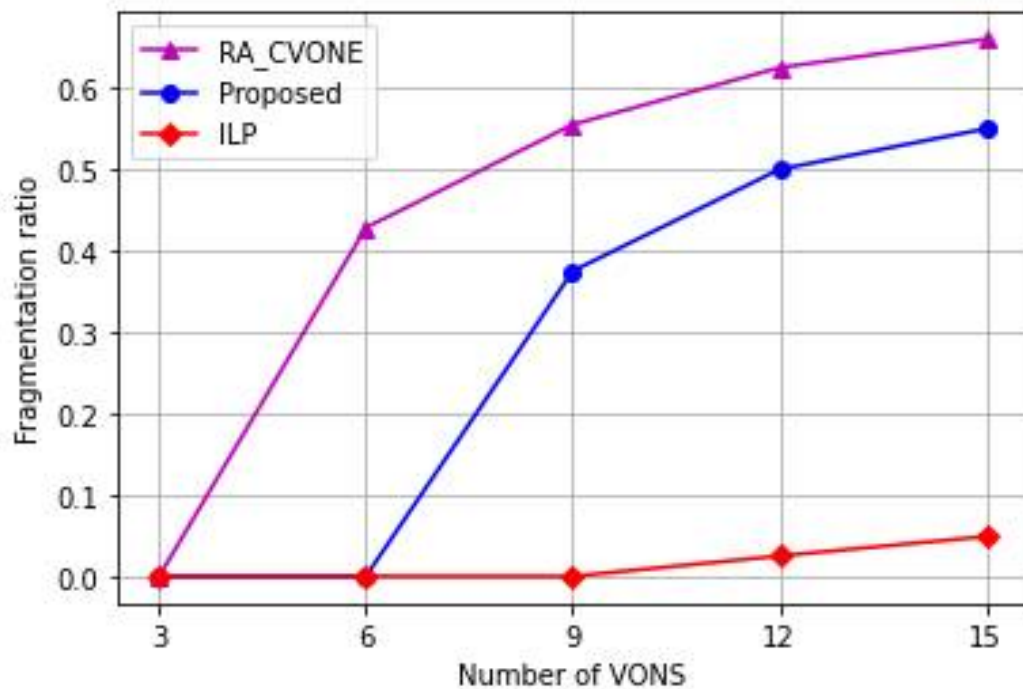
شکل ۴-۲ میانگین تعداد شکاف‌های استفاده شده از الگوریتم ILP و دو الگوریتم شهودی را روی تعداد متفاوت درخواست VON در یک توپولوژی پنج گره نشان می‌دهد. همانطور که نشان داده شده است، باوجود اینکه RA_CVONE یک الگوریتم هماهنگ را اتخاذ می‌کند، از تاثیر توازن ترافیکی و سیاست تخصیص طیف، که تاثیر بسزایی در تکه‌تکه شدن دارد، بی اطلاع است. الگوریتم پیشنهادی نتایج بهتری را در طیف وسیعی از درخواست‌های VON نسبت به RA_CVONE تولید کرده است، زیرا در طول فرآیند VONE جنبه‌های مختلف نگاشت را در نظر می‌گیرد تا تکه‌تکه شدن و استفاده از طیف را کاهش دهد و به بهبود کلی ۲۱،۹ درصد دست می‌یابد و همچنین نزدیک‌ترین نتایج را نسبت مدل ILP در مقایسه الگوریتم محک به دست آورده است.



شکل ۴-۲. مقایسه عملکرد میانگین تعداد بیشینه شکاف‌های استفاده شده در شبکه ۵ گره

شکل ۴-۳ نسبت تکه‌تکه شدن طیف (FR)^۱ را نشان می‌دهد. با افزایش تعداد درخواست‌های VON ارائه شده، تکه‌تکه شدن بیشتری در شکاف‌ها رخ می‌دهد و مقدار FR بزرگ‌تر می‌شود. ۱۶,۶ درصد بهبود در نسبت تکه‌تکه شدن در ۱۵ درخواست مجازی در الگوریتم پیشنهادی دیده می‌شود. در حالت کلی ۳۳,۸۱ درصد بهبود نسبت به الگوریتم محک داشته است علت این بهبود به علت استفاده از سیاست تخصیص طیف تناسب دقیق و رتبه‌بندی شبکه بستر و درخواست شبکه مجازی براساس بعد دیگر (یعنی ویژگی‌های توپولوژیکی آن‌ها) است.

^۱ Fragmentation Ratio



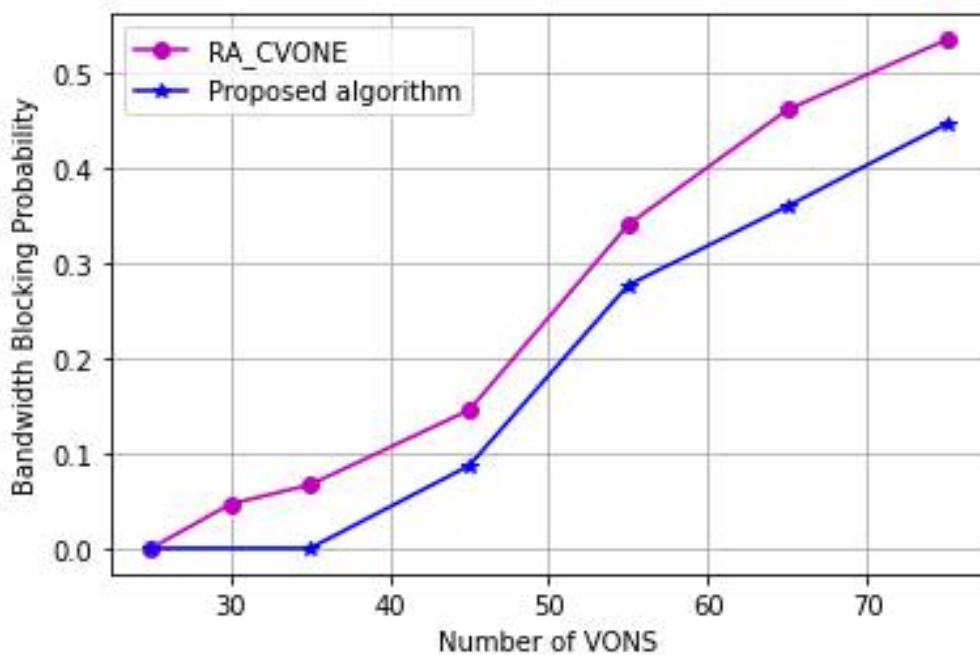
شکل ۴-۳. مقایسه عملکرد نسبت تکه‌تکه شدن در شبکه ۵ گره

همانطور که مشاهده می‌شود الگوریتم پیشنهادی می‌تواند استفاده از طیف در شبکه کوچک پنج گره را تا حد زیادی افزایش دهد و از هدر رفتن منابع طیفی تا حد قابل توجهی جلوگیری کند و نسبت تکه‌تکه شدن کمتری را داشته باشد.

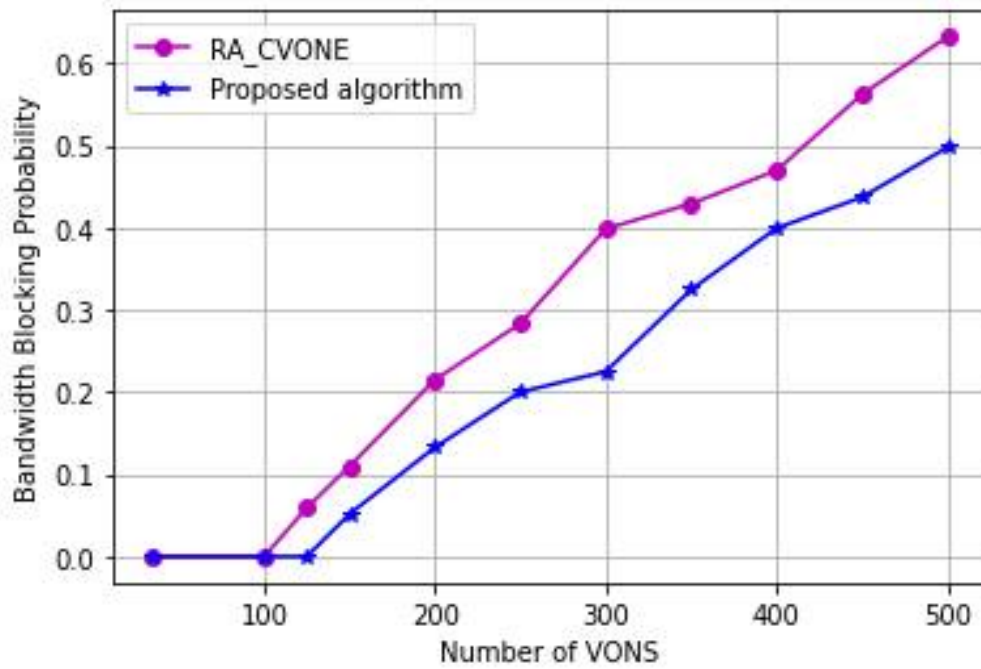
۴-۲- بررسی عملکرد الگوریتم در مقیاس درخواست‌های بالا

شکل ۴-۴ تا ۴-۶ احتمال مسدود شدن پهنای باند الگوریتم پیشنهادی و RA_CVONE را در سه توپولوژی معرفی شده در شکل ۴-۱ نشان می‌دهد. الگوریتم پیشنهادی رتبه‌بندی گره‌های مجازی و گره‌های فیزیکی را ارزیابی می‌کند، احتمال شکست را هنگام تعبیه VN گلوگاه کاهش می‌دهد. علاوه بر این با در نظر گرفتن حالت شبکه، قبل و بعد از نگاشت می‌تواند یک مسیرنوری فیزیکی با تکه‌تکه شدن طیف کمتر و منابع موجود کافی برای نگاشت پیوند نوری مجازی انتخاب کند، می‌تواند احتمال مسدودسازی پهنای باند را کاهش دهد.

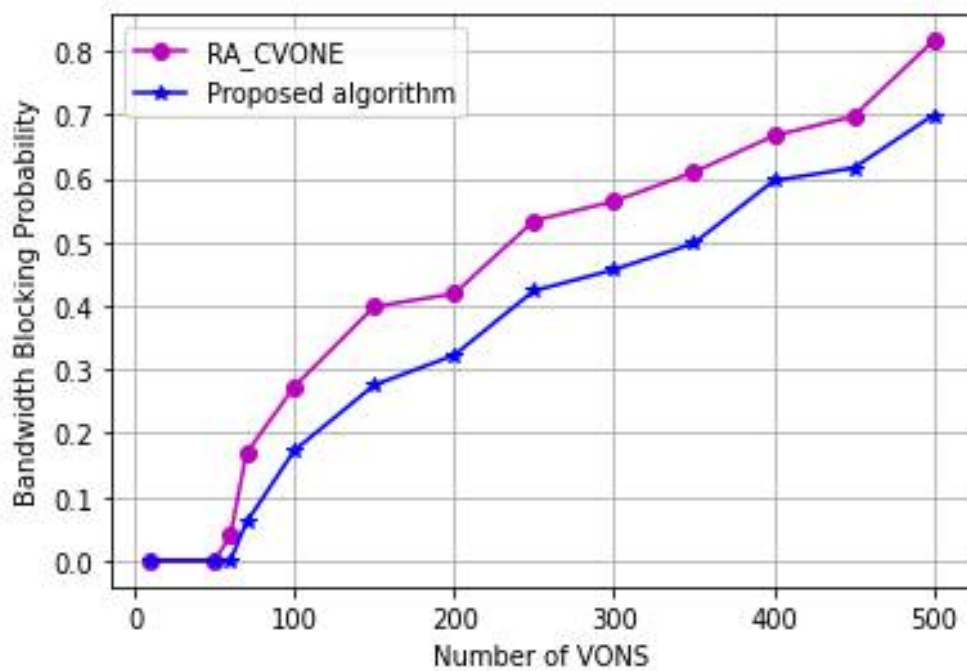
شکل ۴-۴ نشان می‌دهد که الگوریتم پیشنهادی ۳۵ درخواست VON را بدون مسدود کردن هیچ درخواستی نگاشت می‌دهد، در حالی که برای RA_CVONE، این تعداد ۲۵ درخواست است. الگوریتم پیشنهادی با پردازش ۷۵ درخواست VON، ۱۶,۵ درصد بهبود می‌یابد. شکل ۴-۵ نشان می‌دهد که چگونه الگوریتم پیشنهادی عملکرد را ۲۸,۰۷ درصد در ۵۰۰ درخواست VON در طول VONE در توپولوژی شبکه DT بهبود بخشیده است. همانطور که در شکل ۴-۶ نشان داده شده است، با ۵۰۰ درخواست VONE در توپولوژی US، به ۳۵,۱ درصد بهبود دست یافته است و احتمال مسدود سازی توسط الگوریتم پیشنهادی در این شبکه به ۲۹,۱۱ درصد کاهش می‌یابد.



شکل ۴-۴. نتایج شبیه سازی بر روی احتمال مسدودسازی پهنای باند بر روی شبکه ۵ گره

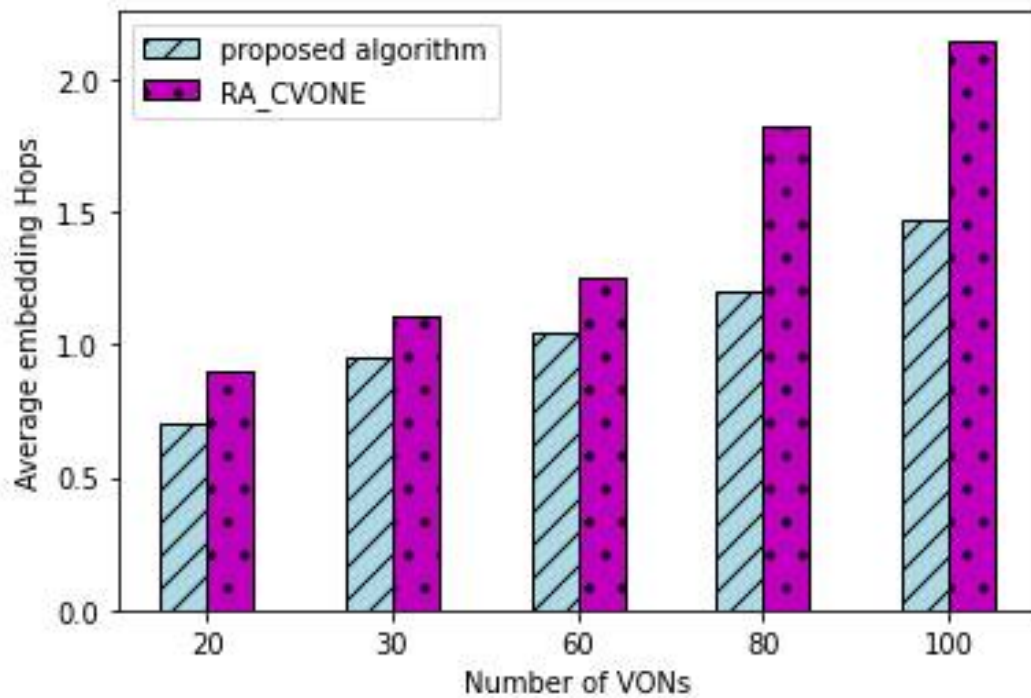


شکل ۴-۵. مقایسه عملکرد احتمال مسدودسازی پهنای باند بر روی شبکه ۱۴ گره DT

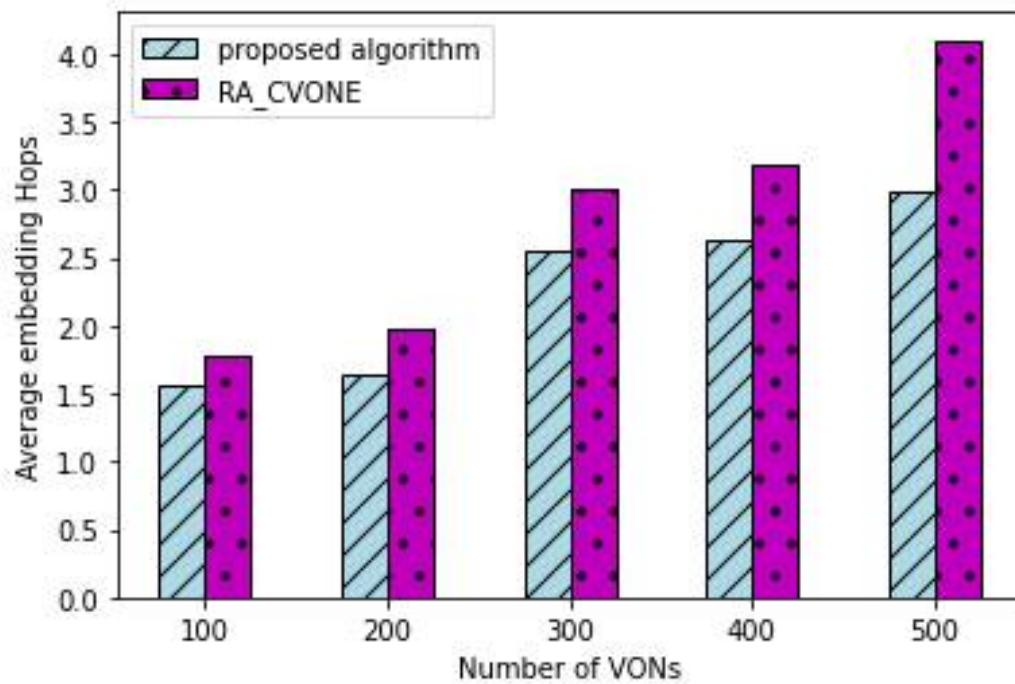


شکل ۴-۶. نتایج شبیه‌سازی بر روی احتمال مسدودسازی پهنای باند بر روی شبکه ۲۴ گره US

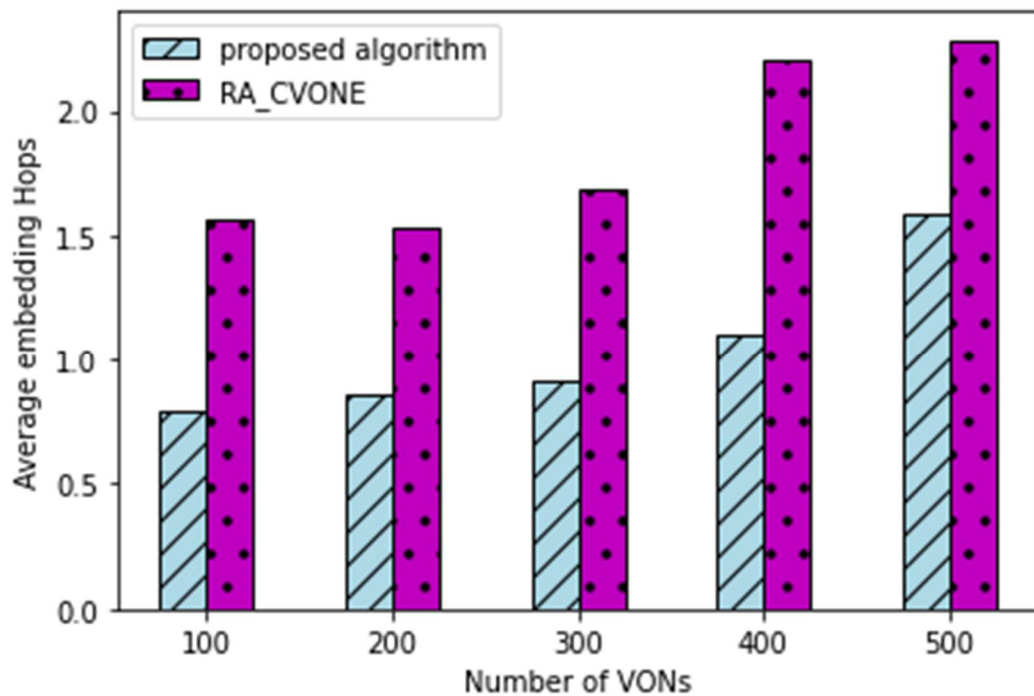
در شکل‌های ۴-۷ تا ۴-۹ میانگین جهش‌های نگاشت شده الگوریتم VONE را بر روی تعداد درخواست‌های مختلف VON در شبکه ۵ گره، DT و USNET نشان می‌دهد.



شکل ۴-۷. مقایسه عملکرد میانگین جهش‌های نگاشت شده در شبکه ۵ گره



شکل ۴-۸. مقایسه عملکرد میانگین جهش‌های نگاشت شده در شبکه DT



شکل ۴-۹. مقایسه عملکرد میانگین جهش‌های نگاشت شده در شبکه US

الگوریتم پیشنهادی با در نظر گرفتن حالت نگاشت VN‌ها، که می‌تواند VN‌های همسایه را به گره‌های فیزیکی نزدیک‌تر تعبیه کند و در نظر گرفتن توازن ترافیکی می‌تواند به نگاشت VOL‌ها در مسیرهای نور فیزیکی کوتاه‌تر نیز کمک کند. بنابراین، الگوریتم پیشنهادی می‌تواند به طور موثر طول مسیرهای نور فیزیکی را که VOL در آن‌ها تعبیه شده است، کوتاه کند.

در هر سه شکل بهبود در میانگین جهش‌های نگاشت شده مشاهده می‌شود این بهبود میانگین جهش‌های نگاشت شده، در شبکه ۵ گره‌ای ۲۳,۵۶ درصد است در شبکه DT، ۱۷,۸۱ درصد و در شبکه US ۳۴ درصد می‌باشد.

مشاهده می‌شود که الگوریتم شهودی پیشنهادی عملکرد بهتری در شبکه‌های بزرگ زمانی که تعداد قابل توجهی از درخواست‌های VON را پردازش می‌کند دارد زیرا این الگوریتم از تاثیر توازن ترافیکی در عین استفاده از سیاست تناسب دقیق بهره می‌گیرد.

فصل ۵ - نتیجه‌گیری

۵-۱- نتیجه‌گیری

مجازی‌سازی شبکه مزایای زیادی برای جامعه شبکه و فضای محاسبات ابری دارد. نگاشت شبکه مجازی (VNE) یک امر بسیار مهم در تحقق مجازی‌سازی شبکه است. برای دستیابی به عملکرد کارآمد شبکه‌های مجازی، داشتن یک الگوریتم کارآمد VNE ضروری است.

در این پایان‌نامه، یک الگوریتم VONE هماهنگ بر روی EON بر اساس توازن ترافیکی و سیاست تناسب دقیق پیشنهاد شده است. در الگوریتم پیشنهادی در ابتدا، برای نگاشت گره مجازی معیاری براساس ویژگی‌های توپولوژیکی، حالت گره مجازی، نیازمندی‌های و منابع موجود برای رتبه‌بندی گره مجازی و گره فیزیکی در جهت کاهش استفاده از شکاف‌های طیفی و همچنین کوتاه‌تر شدن مسیرنوری فیزیکی تخصیص داده شده معرفی می‌شود. پس از آن برای نگاشت پیوند مجازی از سه مرحله متفاوت استفاده می‌شود تا نهایتاً باعث کاهش تکه‌تکه شدن طیفی در شبکه بستر می‌شود. نتایج شبیه‌سازی نشان می‌دهد که الگوریتم شهودی به طور قابل توجه‌ای بهره‌وری و کارایی طیفی و تکه‌تکه شدن طیفی را در مقایسه با الگوریتم محک RA_CVONE کاهش می‌دهد.

۵-۲- پیشنهادات

- در نظر گرفتن نگاشت گره یک به چند که در آن تقسیم VN و ادغام VN در نگاشت گره مجاز باشد.
- خارج کردن مسئله از حالت سازگاری با فاصله، در نظر گرفتن فاصله فیزیکی پیوندها و تعیین فرمت مدولاسیون (متفاوت بودن تعداد شکاف طیفی مورد استفاده).
- در نظر گرفتن خرابی‌های لایه فیزیکی و تاثیر آن بر روی VONE.
- در نظر گرفتن سیاست‌های مسیرنوری منطبق و طراحی جدید معیارهای نگاشت گره مجازی و پیوند مجازی با در نظر گرفتن ویژگی‌های خاص هر شبکه بستر.
- در نظر گرفتن الگوریتم به صورت قابل بقا که در مرحله نگاشت پیوند، سیاست تقسیم مسیر تطبیقی به کار گیرد.
- بازاعمالی درخواست‌های مجازی مسدود شده و بهینه سازی مجدد آنان.

پیوست أ- واژه‌نامه فارسی-انگلیسی

Equivalent English	واژه فارسی	Equivalent English	واژه فارسی
Distance-adaptive	سازگار با فاصله	Super	ابر
Index	شاخص	Ossification	استخوان سازی
Flex-grid	شبکه انعطاف پذیر	Accommodation	اسکان
Slot	شکاف	Substrate	بستر
Heuristic	شهودی	consequence	پیامد
Computational Capacity	ظرفیت محاسباتی	Proactive	پیشگیرانه
Gap	فاصله	Embedding	تعبیه
Non-overlapping	غیرهمپوشان	Exact fit	تناسب دقیق
Edge	لبه	Multiplexing	تسهیم
Virtualization	مجازی سازی	Interaction	تعامل
Adjacent	مجاور	Fragmentation	تکه تکه شدن
Border	مرز	Distributed	توزیع شده
Metric	معیار	Hop	جهش
Scalability	مقیاس پذیری	Failure	خرابی
Lightpath	مسیرنوری	Granularity	دانه بندی
Mapping	نگاشت	Large-Scale	در مقیاس بزرگ
Coordinated	هماهنگ	Ranking	رتبه بندی
Attribute	ویژگی	Subcarrier	زیر حامل
		Infrastructure	زیر ساخت

پیوست ب - واژه‌نامه انگلیسی-فارسی

Equivalent English	واژه فارسی	Equivalent English	واژه فارسی
Hop	جهش	Accommodation	اسکان
Index	شاخص	Adjacent	مجاور
Infrastructure	زیرساخت	Attribute	ویژگی
Intraction	تعامل	Border	مرز
lightpath	مسیرنوری	Bitrate	نرخ داده
Large-scale	در مقیاس بزرگ	Coordinated	هماهنگ
Metric	معیار	Consequence	پیامد
Mapping	نگاشت	Computational Capacity	ظرفیت محاسباتی
Multiplexing	تسهیم	Distributed	توزیع شده
Non-overlapping	غیرهمپوشان	Distance-adaptive	سازگار با فاصله
Ossification	استخوان‌سازی	Edge	لبه
Proactive	پیشگیرانه	Embedding	تعبیه
Ranking	رتبه‌بندی	Exact fit	تناسب دقیق
Super	ابر	Fragmentation	تکه‌تکه شدن
Substrate	بستر	Fauler	خرابی
Subcarrier	زیرحامل	Flex-grid	شبکه انعطاف‌پذیر
Slot	شکاف	Gap	فاصله
Scalability	مقیاس‌پذیری	Granularity	دانه‌بندی
Virtualization	مجازی‌سازی	Heuristic	شهودی

فهرست مرجع ها

- [١] Turner, Jonathan S., and David E. Taylor. "Diversifying the internet." GLOBECOM'05. IEEE Global Telecommunications Conference, Vol. 2. IEEE, 2005.
- [٢] Gerstel, Ori, et al. "Elastic optical networking: A new dawn for the optical layer?." IEEE communications Magazine 50.2 (2012): s12-s20
- [٣] Belbekkouche, Abdeltouab, Md Mahmud Hasan, and Ahmed Karmouch. "Resource discovery and allocation in network virtualization." IEEE Communications Surveys & Tutorials 14.4 (2012): 1114-1128
- [٤] Mukherjee, Biswanath, et al., eds. Springer Handbook of Optical Networks. Springer Nature, 2020
- [٥] F.Baroncelli, B. Martini, and P. Castoldi, "Network virtualization for cloud computing", annals of telecommunications-Annales des telecommunications, vol. 65, no. 11-12, pp. 713-721, 2010
- [٦] Zhu, Min, et al. "Fragmentation-aware VONE in elastic optical networks." IEEE/OSA Journal of Optical Communications and Networking 10.9 (2018): 809-822
- [٧] Yuan, Ying, et al. "Topology-oriented virtual network embedding approach for data centers." IEEE access 7 (2018): 2429-2438.
- [٨] Soto, Paola, and Juan F. Botero. "Greedy randomized path-ranking virtual optical network embedding onto EON-based substrate networks." 2017 IEEE Colombian Conference on Communications and Computing (COLCOM). IEEE, 2017
- [٩] Kosaka, Shun, et al. "Shared protected elastic optical path network design that applies iterative re-optimization based on resource utilization efficiency measures." European Conference and Exhibition on Optical Communication. Optical Society of America, 2012.
- [١٠] Zhu, Ruijie, et al. "Time and spectrum fragmentation-aware virtual optical network embedding in elastic optical networks." Optical Fiber Technology 54 (2020): 102117
- [١١] L. Gong and Z. Zhu, "Virtual optical network embedding (VONE) over elastic optical networks," J. Lightwave Technol., vol. 32, no. 3, pp. 450–460, Feb. 2014.
- [١٢] Wei, Wenting, et al. "Optimizing energy and spectrum efficiency of virtual optical network embedding in elastic optical networks." Optical Switching and Networking 37 (2020): 100568.

-
- [١٣] W. Wang, Y.L. Zhao, R.Y. He, et al., Continuity aware spectrum allocation schemes for virtual optical network embedding in elastic optical networks, *Opt. Fiber Technol.* 29 (2016) 28–33.
 - [١٤] Chowdhury, Mosharaf, Muntasir Raihan Rahman, and Raouf Boutaba. "Vineyard: Virtual network embedding algorithms with coordinated node and link mapping." *IEEE/ACM Transactions on networking* 20.1 (2011): 206-219.
 - [١٥] L. Gong, Z. Zhu, Virtual optical network embedding (VONE) over elastic optical networks, *J. Lightwave Technol.* 32 (3) (2013) 450–460..
 - [١٦] H.X. Wang, J.X. Zhao, L. Hui, et al., Opaque virtual network mapping algorithms based on available spectrum adjacency for elastic optical networks, *Sci. China Inform. Sci.* 59 (4) (2016) 1–11.
 - [١٧] Liu, Huanlin, et al. "A coordinated virtual optical network embedding algorithm based on resources availability-aware over elastic optical networks." *Optical Fiber Technology* 45 (2018): 391-398.
 - [١٨] Gong, Long, and Zuqing Zhu. "Virtual optical network embedding (VONE) over elastic optical networks." *Journal of Lightwave Technology* 32.3 (2013): 450-460.
 - [١٩] Simmons, Jane M. *Optical network design and planning*. Springer, 2014.
 - [٢٠] Lord, Andrew, et al. "Evolution from wavelength-switched to flex-grid optical networks." *Elastic Optical Networks* (2016): 7-30.
 - [٢١] ITU-T Rec. G.694.1, "Spectral grids for WDM applications: DWDM frequency grid", 2012.
 - [٢٢] Zhu, Keyao, and Biswanath Mukherjee. "Traffic grooming in an optical WDM mesh network." *IEEE Journal on selected areas in communications* 20.1 (2002): 122-133.
 - [٢٣] Nag, Avishek, Massimo Tornatore, and Biswanath Mukherjee. "Optical network design with mixed line rates and multiple modulation formats." *Journal of Lightwave Technology* 28.4 (2009): 466-475.
 - [٢٤] Mukherjee, Biswanath. *Optical WDM networks*. Springer Science & Business Media, 2006..
 - [٢٥] Yu, Xiaosong, et al. "Migration from fixed grid to flexible grid in optical networks." *IEEE Communications Magazine* 53.2 (2015): 34-43.
 - [٢٦] Jinno, Masahiko, et al. "Spectrum-efficient and scalable elastic optical path network: architecture, benefits, and enabling technologies." *IEEE communications magazine* 47.11 (2009): 66-73.
 - [٢٧] Jinno, Masahiko. "Elastic optical networking: Roles and benefits in beyond 100-Gb/s era." *Journal of Lightwave Technology* 35.5 (2016): 1116-1124.
 - [٢٨] ٢٨]]. B. C. Chatterjee, N. Sarma, and E. Oki, "Routing and Spectrum Allocation in Elastic Optical Networks: A Tutorial", *IEEE Communication Surveys & Tutorials*, Vol. 17, No. 3, pp. 1776-1800, Third Quarter, 2015.
 - [٢٩] ٢٩]]. B. C. Chatterjee, S. Ba, and E. Oki, "Fragmentation Problems and Management Approaches in Elastic Optical Networks: A Survey", *IEEE Communications Surveys & Tutorials*, Vol. 20, No. 1, pp. 183-210, 2018.
 - [٣٠] B.C. Chatterjee, N. Sarma and E. Oki, "Routing and spectrum allocation in elastic optical networks: a tutorial", *IEEE Commun. Surv. Tutor*, vol. 17, no. 3, pp. 1776-1800, 2015.

- [31] López, Victor, and Luis Velasco. "Elastic optical networks." Architectures, Technologies, and Control, Switzerland: Springer Int. Publishing (2016).
- [32] J. Carapinha and J. Jiménez, "Network virtualization: a view from the bottom", Proceedings of the 1st ACM workshop on Virtualized infrastructure systems and architectures, pp. 73-80, 2009.
- [33] K. Zhu, Z. Yao, N. He, D. Li, and L. Zhang, "Toward Full Virtualization of the Network Topology", IEEE Systems Journal, Vol. 13, No. 2, pp. 1640-1649, Jun. 2019.
- [34] Fischer, J. F. Botero, M. T. Beck, et al., "Virtual Network Embedding: A Survey", IEEE Communications Surveys & Tutorials, Vol. 15, No. 4, pp. 1888-1906, 2013.
- [35] 35]. N.M. M. K. Chowdhury, and R. Boutaba, "A survey of network virtualization", Computer Networks, Vol. 54, pp. 862–876, 2010.
- [36] J. Carapinha and J. Jiménez, "Network virtualization: a view from the bottom", Proceedings of the 1st ACM workshop on Virtualized infrastructure systems and architectures, pp. 73-80, 2009.
- [37] Chatterjee, Bijoy Chand, Seydou Ba, and Eiji Oki. "Fragmentation problems and management approaches in elastic optical networks: A survey." IEEE Communications Surveys & Tutorials 20.1 (2017): 183-210.
- [38] Chatterjee, Bijoy Chand, and Eiji Oki. "Dispersion-adaptive first-last fit spectrum allocation scheme for elastic optical networks." IEEE Communications Letters 20.4 (2016): 696-699..
- [39] Liu, Huanlin, et al. "A survivable VON embedding algorithm based on resource mean and spectrum coherence-aware in elastic optical networks." Optical Fiber Technology 54 (2020): 102103..

انتشارات

Niusha Sabri kadijani, Loftallah Beygi , "Fragmentatio-aware Coordinated Virtual Optical Network Embedding Over Elastic Optical Networks ", 30th Iranian Conference on Electrical Engineering (ICEE 2022), Dec. 2022.in press.

Abstract

Network virtualization has become a key solution for meeting the exploding needs of users and applications because of the growing demand for high performance-applications and cloud network services. Virtual optical network embedding (VONE) over elastic optical networks (EONs) is a fundamental technology to realize network virtualization. The VONE over EON is suffering from poor and uneffiecnt spectrum utilization due to the existence of non-aligned and non-contiguous slots, which is known as spectrum fragmentation. The goal of our coordinated algorithm based on the traffic balancing and exact fit policy is to minimize the average number of used slots and shorten the length of the physical lightpath serves a virtual optical links. Results show not only our algorithm achieve the closest results to the ILP method, but also it improves the average number of used slots in a five-node topology by 21.9%. In addition, in a large topology, it significantly reduces the length of the lightpaths that serve virtual optical links, improving spectrum utilization and the probability of blocking bandwidth in a 24-node network is reduced to about 30%.

Keywords: Virtual optical network embedding (VONE), Elastic optical networks (EONs), Spectrum fragmentation, Cloud Computing.



K. N. Toosi University of Technology
Faculty of Electrical Engineering

A Thesis Submitted in Partial Fulfillment of the Requirements
for the Degree of Master of Science (M.Sc.)
In Electrical Engineering - Communication

Design and Simulation of Spectrum Assignment Algorithms for Elastic Optical
Network in Cloud Computing Virtualization

By:

Niusha Sabri Kadijani

Supervisor:

Professor Lotfollah Beygi

Winter 2022