


تخصیص منابع نوری مبتنی بر همواری سیگنال های گرافی

مجله علوم و فناوری های پدافند نوین

محمدحسین زارعی^۱، محمدرضا پاکروان^{۲*} , محمدهادی^۳

۱- دانشجوی دکتری، ۲- دانشیار، ۳- استادیار دانشگاه صنعتی شریف

(دریافت: ۱۴۰۳/۰۹/۰۸، بازنگری: ۱۴۰۳/۱۰/۲۵، پذیرش: ۱۴۰۳/۱۱/۲۴، انتشار: ۱۴۰۳/۱۲/۱۱)

چکیده

با پیشرفت روزافزون فناوری، حجم ترافیک شبکه نیز به طرز چشمگیری افزایش داشته است. شبکه‌ی نوری به‌عنوان بخش اصلی شبکه‌ی زیرساخت، نقش بسزایی در انتقال ترافیک شبکه دارد. با توجه به محدودیت منابع موجود در شبکه، تخصیص بهینه‌ی منابع در شبکه‌های نوری، مسئله‌ی بسیار مهمی است که می‌تواند باعث افزایش بهره‌وری شبکه و کاهش هزینه‌ها شود. حل مسائل بهینه‌سازی تخصیص منابع، به یک ابزار کارآمد نیاز دارد. از آنجاکه ابزار پردازش سیگنال گرافی یکی از ابزارهایی است که در سال‌های اخیر کاربرد بسیاری در حل مسائل گوناگون پیدا کرده است، در این مقاله قصد داریم مسئله‌ی مسیریابی و تخصیص طول موج را به کمک این ابزار حل کنیم. به این منظور، پس از معرفی مسائل و مفاهیم مرتبط با شبکه‌های نوری و ابزار پردازش سیگنال گرافی، به مدل‌سازی منابع شبکه در قالب سیگنال‌های گرافی پرداخته و سپس، روشی مبتنی بر همواری سیگنال‌های گرافی برای حل مسئله‌ی مسیریابی و تخصیص طول موج ارائه می‌کنیم. برای نشان دادن مدیریت بهینه‌ی منابع این روش، شبیه‌سازی‌های متعددی انجام شده است. نتایج این شبیه‌سازی‌ها نشان می‌دهد که روش ارائه‌شده در مقایسه با روش‌های رایج، قادر است در زمان اجرای معقولی، احتمال انسداد درخواست ترافیک را به اندازه‌ی قابل توجهی کاهش دهد.

کلیدواژه‌ها: شبکه‌های نوری، تخصیص منابع، پردازش سیگنال گرافی، مسیریابی، تخصیص طول موج، همواری.

Optical Resource Allocation Based on Graph Signal Smoothness

M. H. Zarei, M. R. Pakravan* , M. Hadi

Sharif University of Technology

(Received: ۲۰۲۴/۱۱/۲۸, Revised: ۲۰۲۵/۰۱/۱۴, Accepted: ۲۰۲۵/۰۲/۱۲, Published: ۲۰۲۵/۰۳/۰۱)

Abstract

With the advancement of technology, the volume of network traffic has also increased dramatically. The optical network, as the main part of the backbone communication system, plays a significant role in the transmission of network traffic. Due to the limited network resources, an efficient resource allocation in optical networks is required to increase network performance and reduce costs. To solve resource allocation optimization problems, an effective tool is needed to provide a suitable solution in a reasonable time. Graph signal processing is one of the tools that has been used a lot in recent years to solve various problems. Therefore, in this paper, we intend to use graph signal processing to solve routing and wavelength assignment problem. In this regard, after introducing the problems and concepts related to optical networks and graph signal processing tool, we model network resources in the form of graph signals, and then, we present a method based on graph signal smoothness to solve the mentioned resource allocation problem. In order to demonstrate the optimal resource management of this method, we perform numerous simulations. The simulation results show that the proposed method significantly reduces request blocking probability at a reasonable execution time compared to the common benchmark methods.

Keywords: Optical Networks, Resource Allocation, Graph Signal Processing, Routing, Wavelength Assignment, Smoothness.

*Corresponding Author E-mail: pakravan@sharif.edu

۱. مقدمه

مسئله‌ی تخصیص منابع نوری به بازپیکربندی کارآمد یک شبکه‌ی نوری با توجه به محدودیت‌های شبکه می‌پردازد. به دلیل پیچیدگی فزاینده، یافتن یک راه حل مستقیم و تک‌مرحله‌ای برای این مسئله معمولاً غیرممکن است. از این رو، مسئله‌ی تخصیص منابع نوری به چند زیر مسئله شکسته شده و هر کدام به صورت جداگانه حل می‌شوند. این رویکرد چندمرحله‌ای امکان دستیابی به یک راه حل زیر بهینه را در زمانی معقول فراهم می‌کند [۵، ۶].

یکی از مسائل رایج تخصیص منابع نوری، مسئله‌ی مسیریابی و تخصیص طول موج است. مسئله‌ی مسیریابی به انتخاب بهترین مسیر میان تمامی مسیرهای موجود بین مبدأ و مقصد هر درخواست ترافیک می‌پردازد که این انتخاب می‌تواند بر اساس عواملی مانند حداقل پهنای باند لینک، تأخیر مسیر، تعداد گره‌ها و تعداد تقویت‌کننده‌ها انجام شود [۱]. همچنین در شبکه‌های نوری مبتنی بر تسهیم طول موج^۶ که یک ترافیک از چندین گره میانی در حوزه‌ی نوری عبور می‌کند، لازم است که یک طول موج ثابت به آن اختصاص داده شود. یک رویکرد کارآمد تخصیص طول موج، استفاده از طول موج‌ها را با رعایت قید پیوستگی طول موج^۷ به حداقل می‌رساند. در مسیریابی و تخصیص طول موج تک‌مرحله‌ای، قید پیوستگی طول موج در زمان انتخاب مسیر برای هر درخواست ترافیک لحاظ می‌شود [۱]. در شکل پیشرفته‌تر مسئله‌ی مسیریابی و تخصیص طول موج در شبکه‌های نوری منعطف^۸ مبتنی بر تسهیم فضا^۹، تخصیص بهینه‌ی سایر منابع، مانند فرمت مدولاسیون، هسته‌ی فیبر و حالت انتقال، مورد بررسی قرار می‌گیرد [۷].

برای تحلیل و حل مسائل تخصیص منابع نوری و به صورت خاص، مسئله‌ی مسیریابی و تخصیص طول موج، روش‌های مختلفی به کار گرفته می‌شوند. روش‌های تجربی مانند الگوریتم ژنتیک^{۱۰} و بهینه‌سازی کلونی زنبور عسل^{۱۱} برای یافتن راه حل نزدیک به بهینه استفاده می‌شوند [۸، ۶]. روش‌های برنامه‌ریزی پویا^{۱۲} با فدا کردن بهینگی، مسئله را به یک دنباله از زیرمسائل ساده‌تر تجزیه کرده که هر کدام سریع‌تر حل می‌شوند [۱۰، ۹]. روش‌های بهینه‌سازی هندسی و لیاپانوف نیز از جمله ابزارهایی هستند که در شبکه‌های نوری منعطف برای تخصیص منابع به کار گرفته شده‌اند [۱۲، ۱۱]. یادگیری ماشین به‌عنوان ابزاری نوین، در صورت‌های مختلف مسئله‌ی تخصیص منابع نوری با موفقیت استفاده شده است [۶].

شبکه‌های فیبر نوری نه تنها بخش اصلی شبکه‌های زیرساخت هستند، بلکه به‌عنوان یک راه‌کار متداول برای شبکه‌های دسترسی نیز مورد استفاده قرار می‌گیرند. در این شبکه‌ها، تخصیص بهینه‌ی منابع امری ضروری است تا منابع شبکه به صورت مؤثر به درخواست‌های ترافیکی تخصیص داده شوند؛ به طوری که عملکرد شبکه بهینه‌شده و در عین حال تعهدات کیفیت خدمات^۱ و محدودیت‌های فیزیکی شبکه رعایت گردند [۱].

مسئله‌ی تخصیص منابع معمولاً به‌عنوان یک مسئله‌ی بهینه‌سازی در مقیاس بزرگ مدل می‌شود که هدف، قیود و متغیرهای آن به ترتیب بهبود عملکرد شبکه، محدودیت‌های فیزیکی و کیفیت خدمات و پارامترهای قابل پیکربندی شبکه هستند [۲]. روش‌های متنوعی مانند یادگیری ماشین، نظریه‌ی بازی و گراف برای مدل‌سازی و حل مسائل تخصیص منابع مورد استفاده قرار می‌گیرند که در این میان، نظریه‌ی گراف یک روش مؤثر است [۱، ۳].

پردازش سیگنال گرافی^۲ یک ابزار نوین و قدرتمند است که در حوزه‌های مختلفی، از جمله شبکه‌های اطلاعاتی، یادگیری ماشین، سیستم‌های پیچیده، شبکه‌های اجتماعی و به‌ویژه مسائل مبتنی بر گراف به کار گرفته شده است [۴]. در این مقاله از این ابزار در حل مسائل تخصیص منابع نوری^۳ و به صورت خاص، مسئله‌ی مسیریابی و تخصیص طول موج^۴ استفاده شده است. برای روشن‌تر کردن قابلیت‌های این ابزار در مسائل تخصیص منابع نوری، الگوریتم مسیریابی و تخصیص طول موج مبتنی بر همواری سیگنال‌های گرافی^۵ را با نام GSS-RWA، در ادامه ارائه شده است.

سایر بخش‌های مقاله به این صورت تنظیم شده است: بخش ۲ مسئله و ابزار پژوهش معرفی شده است. در بخش ۳، صورت مسئله مدل شده و روش GSS-RWA شرح داده شده است. در بخش ۴، نتایج شبیه‌سازی الگوریتم ارائه شده به تصویر کشیده می‌شود. در انتها، نتیجه‌گیری مقاله ارائه شده است.

۲. پیش‌زمینه و مرور

در این بخش، مسئله و ابزار پژوهش معرفی شده و با برخی از مفاهیم مرتبط با آن‌ها نیز آشنا می‌شویم.

۲-۱. مسئله‌ی تخصیص منابع در شبکه‌های نوری

^۶ Wavelength-Division Multiplexing (WDM)

^۷ Wavelength continuity

^۸ Elastic Optical Network (EON)

^۹ Space-Division Multiplexing (SDM)

^{۱۰} Genetic Algorithm

^{۱۱} Bee Colony Optimization

^{۱۲} Dynamic Programming

^۱ Quality of Service (QoS)

^۲ Graph Signal Processing (GSP)

^۳ Optica Resource Allocation (ORA)

^۴ Routing and Wavelength Assignment (RWA)

^۵ Graph Signal Smoothness (GSS)

\mathbb{R}^N به صورت $y = Zx$ تعریف می‌شود که $Z \in \mathbb{R}^{N \times N}$ ماتریس عملگر جابه‌جایی گرافی است. برای یک Z داده‌شده، فیلتر گرافی H با ورودی x و خروجی y وقتی خطی و تغییرناپذیر با جابه‌جایی^۹ است که $y = Hx$ و $H = \sum_{k=1}^{K-1} h_k Z^k$ باشد که K و h_k به ترتیب مرتبه و ضرایب حقیقی فیلتر هستند [۴].

با فرض اینکه Z ماتریسی متقارن و حقیقی باشد، تجزیه‌ی ویژه $Z = U\Lambda U^T$ را می‌پذیرد که در آن $U = [u_1, u_2, \dots, u_N]$ یک ماتریس متعامد یک‌ه شامل بردارهای ویژه $u_i \in \mathbb{R}^N$ و $\Lambda = \text{diag}(\lambda_1, \lambda_2, \dots, \lambda_N)$ یک ماتریس قطری شامل مقادیر ویژه $(\lambda_1 \leq \lambda_2 \leq \dots \leq \lambda_N)$ است [۴]. در پردازش سیگنال گرافی، بردارهای ویژه Z حوزه‌ی فرکانس را تشکیل داده و مقادیر ویژه Z فرکانس‌های گرافی هستند. برای هر سیگنال گرافی $x \in \mathbb{R}^N$ ، تبدیل فوریه‌ی گرافی^{۱۰} آن $\hat{x} \in \mathbb{R}^N$ به صورت $\hat{x} = U^T x$ تعریف می‌شود که درایه‌ی i -ام آن مؤلفه‌ی فرکانسی متناظر با λ_i است. معکوس تبدیل فوریه‌ی گرافی نیز به صورت $x = U \hat{x}$ است [۴].

اگر $Z = L$ باشد، فرکانس‌های گرافی تغییرات سیگنال را در طول یال‌ها توصیف می‌کنند؛ به طوری که مقادیر ویژه‌ی کوچک‌تر متناظر با فرکانس‌های پایین‌تر هستند. از این‌رو، اگر مقادیر تبدیل فوریه‌ی گرافی یک سیگنال گرافی متناظر با مقادیر ویژه‌ی بزرگ صفر باشند، سیگنال گرافی پایین‌گذر محسوب می‌شود [۴].

پردازش سیگنال گرافی در بسیاری از کاربردها از جمله شبکه‌های حسگر، شبکه‌های عصبی و علوم داده با موفقیت به کار گرفته شده است. پردازش سیگنال گرافی ابزاری متنوع است که برای فشرده‌سازی داده‌ها، حذف نویز، بازسازی و پردازش توزیع شده در شبکه‌های حسگر استفاده می‌شود [۴]. مسائل طبقه‌بندی و خوشه‌بندی، به‌عنوان دو مسئله‌ی مهم در علوم داده، با گرافی مدل‌سازی می‌شوند که گره‌ها و یال‌های آن به ترتیب نقاط داده و شباهت‌های داده‌های متناظر را نشان می‌دهند و با استفاده از تبدیل فوریه‌ی گرافی بر روی گراف حل می‌شوند [۴]. فیلترهای گرافی استخراج ویژگی‌ها را در شبکه‌های عصبی کانولوشنی^{۱۱} و گرافی بهبود می‌بخشند [۱۳]. به‌طور کلی، پردازش سیگنال گرافی برای هر مسئله‌ای که در آن گراف یک نمایش عمومی از شبکه یا مجموعه داده‌های درگیر در مسئله را ارائه می‌دهد، می‌تواند مفید واقع شود.

۳. روش مبتنی بر همواری سیگنال‌های گرافی

در این بخش، روش مبتنی بر پردازش سیگنال گرافی برای حل صورت پویای مسئله‌ی مسیریابی و تخصیص طول‌موج ارائه

با وجود نتایج قابل قبول در برخی موارد، به دلیل ماهیت جعبه سیاه^۱ روش‌های مبتنی بر یادگیری ماشین، گاهی اوقات این روش‌ها منجر به نتایج عجیب و غیرمنتظره‌ای در شرایط خاص شبکه مانند زمان‌های اوج ترافیک می‌شوند [۶].

روش‌های مبتنی بر گراف سابقه‌ی قابل توجهی در حل مسائل تخصیص منابع نوری پایه‌ای دارند. الگوریتم‌های معروف کوتاه‌ترین مسیر، مانند دایکسترا^۲ و جستجوی اول سطح^۳ راه‌حل‌های پایه‌ای برای زیر مسئله‌ی مسیریابی هستند [۱]. در روش هرس کردن گراف توپولوژی^۴، یک الگوریتم مسیریابی پایه‌ای بر روی گراف هرس شده اجرا می‌شود که این گراف از حذف پیوندهایی که طول‌موج خاصی در آن‌ها اشغال شده، به‌دست‌آمده است. حال اگر مسیریابی ناموفق باشد، این فرآیند برای گراف هرس شده‌ی دیگری ادامه می‌یابد [۱]. رنگ‌آمیزی گراف^۵ روشی برای مسئله‌ی تخصیص طول‌موج است که در آن طول‌موج‌ها متناظر رنگ‌های مختلف بوده و باید به هر گره گراف تعارض^۶ یک‌رنگ اختصاص داده شود. در گراف تعارض، رئوس و یال‌های آن، به ترتیب نمایانگر درخواست‌های ترافیک و تداخل بین مسیرهای دو درخواست هستند [۱].

۲-۲. ابزار پردازش سیگنال گرافی

فرض کنید گراف وزن‌دار و بدون جهت $G = (V, E)$ با مجموعه‌ی گره‌های V با اندازه‌ی N ، مجموعه‌ی یال‌های E و ماتریس مجاورت W که درایه‌ی w_{ij} آن، وزن یال بین گره‌های i و j ($i, j \in V$) است، داده شده است. مجموعه‌ی همسایگی گره i شامل گره‌هایی است که به گره i متصل هستند. سیگنال گرافی $x \in \mathbb{R}^N$ برداری است که درایه‌ی i -ام آن مقدار سیگنال در گره i را نشان می‌دهد. ماتریس لاپلاسیان L به صورت $L = D - W$ تعریف می‌شود که در آن ماتریس درجه‌ی D یک ماتریس قطری با مقادیر روی قطر $d_{ii} = \sum_{j=1}^N w_{ij}$ است. اگر وزن یال‌ها اعداد حقیقی نامنفی باشند، L ماتریسی متقارن و مثبت نیمه معین خواهد بود و کوچک‌ترین مقدار ویژه‌ی آن، صفر و بردار ویژه‌ی متناظر آن، بردار یک‌ه با درایه‌های یکسان می‌شود [۴].

پردازش سیگنال گرافی عملگر جابه‌جایی^۷ در زمان گسسته را با معرفی عملگر شیفت گرافی^۸ تعمیم می‌دهد که ترکیبی خطی از مقادیر مجموعه‌ی همسایگی است. سیگنال گرافی جابه‌جاشده‌ی

^۱ Black-box

^۲ Dijkstra

^۳ Breadth-First Search (BFS)

^۴ Topology Graph Pruning

^۵ Graph Coloring

^۶ Conflict

^۷ Shift

^۸ Graph Shift Operator (GSO)

^۹ Linear Shift Invariant (LSI)

^{۱۰} Graph Fourier Transform (GFT)

^{۱۱} Convolutional Neural Networks (CNN)

به صورت $RQ = (o, d, \tau)$ معرفی می شود که d و τ به ترتیب نشان دهنده ی مبدأ، مقصد و مدت زمان خدمت است.

برای پاسخ دهی به درخواست های ترافیک، دو مورد باید تعیین شود؛ مسیر ترافیک و بخش طیف. مسیر ترافیک $p = \{p_i\}_{i=1, \dots, (p)}$ شامل تعدادی از پیوندهای شبکه بوده $(p_i \in E)$ و $l(p)$ نشان دهنده ی طول این مسیر از نظر تعداد پیوندها است. بخش طیف تخصیص یافته به درخواست نیز با λ نمایش داده می شود. بنابراین پاسخ درخواست ترافیک به صورت $RS = (p, \lambda)$ معرفی می شود.

به این ترتیب مسئله ی مسیریابی و تخصیص طول موج پویا مدل سازی شد. حال یک ساختار گرافنی جدیدی را معرفی می کنیم که با مدل سازی منابع شبکه روی آن، بتوان منابع را در قالب سیگنال گرافنی مدل کرده و به کمک مفاهیم موجود در پردازش سیگنال گرافنی، راه حلی برای مسئله ارائه کنیم.

متناظر با گراف شبکه ی G ، گراف خط $L(G)$ را معرفی می کنیم. گره های این گراف متناظر با پیوندهای شبکه است. همچنین دو گره گراف خط زمانی همسایه هستند که پیوندهای متناظر این دو گره در گراف شبکه، دارای یکسر مشترک باشند. در این گراف، وزن یال ها را با یک تابع نزولی از درجه ی گره مشترک در گراف شبکه (تعداد همسایه های گره) در نظر گرفته می شود.

برای تعریف وزن های گراف خط و تعریف تابع نزولی، ابتدا درجه ی گره های گراف شبکه را از طریق رابطه ی زیر نرمال می کنیم:

$$z(v_n) = \frac{\deg(v_n) - \min_{deg}}{\max_{deg} - \min_{deg}} \quad (1)$$

که این رابطه درجه ها را به صورت خطی به بازه ی صفر و یک تصویر می کند. در این رابطه، \min_{deg} و \max_{deg} به ترتیب کمینه و بیشینه ی درجه ی گره های گراف است. حال به کمک تابع نمایشی وزن های ماتریس خط را محاسبه می کنیم. به این ترتیب، ماتریس وزن گراف خط به صورت $A = [a_{nm}]_{n,m=1, \dots, M}$ نمایش داده شده که درایه ی a_{nm} برای پیوندهای n و m که گره مشترکی ندارند یا n و m مشابه هستند، صفر و برای جفت پیوندهایی که دارای گره مشترک v هستند، برابر $\exp[-z(v)]$ است. دلیل این نحوه ی تعریف وزن یال های گراف خط در ادامه بیان خواهد شد.

از این پس، برای جلوگیری در ابهام در استفاده از اجزای گراف شبکه و گراف خط، به گره ها و یال های گراف شبکه، گره و پیوند و به گره ها و یال های گراف خط، پیوند و یال می گوییم. در شکل (۱)، مثالی از یک گراف شبکه و گراف خط متناظر آن آمده است. در گراف شبکه، پیوندها شماره گذاری شده اند.

می شود. در صورت پویای این مسئله، تمامی درخواست های ترافیک موجود در شبکه از پیش مشخص نبوده و به مرور و در طول زمان به دست متصدی شبکه می رسند. در چنین مسئله ای، هدف اصلی کاهش احتمال انسداد درخواست های ترافیک وارد شده به شبکه است [۱].

۳-۱. توصیف مسئله

در این مقاله، یک شبکه ی نوری با گراف G و مجموعه ی گره ها و یال های آن به ترتیب با $V = \{v_n\}_{n=1, \dots, N}$ و $E = \{e_i\}_{i=1, \dots, M}$ نمایش داده می شوند که N تعداد گره های نوری و M تعداد پیوندها یا فیبرهای نوری شبکه است. در این شبکه فرض می شود که بین هر دو گره حداکثر یک فیبر وجود دارد. برای نمایش طول فیبرهای نوری شبکه از ماتریس وزن $W = [w_{nm}]_{n,m=1, \dots, N}$ استفاده می شود که w_{nm} نشان دهنده ی طول فیبر بین گره های n و m است. اگر بین این دو گره فیبری نباشد، وزن آن بی نهایت در نظر گرفته می شود.

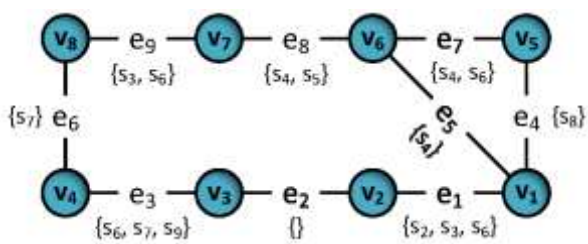
در این شبکه فرض می شود که طیف در دسترس S در همه ی فیبرهای نوری مشابه یکدیگر بوده و به تعدادی بخش کوچک تر تقسیم می شود. در شبکه های نوری WDM، این بخش ها متناظر کانال های طول موج هستند. بنابراین، مجموعه ی $S = \{s_j\}_{j=1, \dots, C}$ خواهد بود که C نشان دهنده ی تعداد بخش های طیف است.

برای نمایش وضعیت آزاد یا اشغال بودن بخش های طیف فیبرهای شبکه، از ماتریس دودویی اشغال $F = [f_{ij}]_{i=1, \dots, M, j=1, \dots, C}$ استفاده می کنیم که f_{ij} زمانی یک است که بخش طیف s_j روی فیبر متناظر پیوند e_i آزاد باشد؛ در غیر این صورت مقدار صفر را می گیرد. سطر i -ام این ماتریس، وضعیت طیف پیوند e_i و ستون j -ام آن، وضعیت s_j را بر روی تمامی پیوندهای شبکه نشان می دهد. به این ترتیب، گراف شبکه ی G به همراه وضعیت توپولوژی و طیف پیوندهای آن به صورت $G = (V, E, S, W, F)$ نمایش داده می شود.

با توجه به صورت پویای مسئله ی تخصیص منابع، درخواست های ترافیک در زمان های نامشخصی به شبکه می رسند. حال در صورت پاسخ دهی به آن ها و عدم انسداد، منابع شبکه به اندازه ی مدت زمان مشخصی در اختیار درخواست ترافیک قرار گرفته و پس از آن، منابع شبکه آزاد می شود. بنابراین، اطلاعات هر درخواست ترافیک، شامل مبدأ، مقصد و مدت زمان مورد نیاز خدمت است. در این مقاله، فرض کرده ایم که حداکثر پهنای باند مورد نیاز هر درخواست ترافیک به گونه ای است که تنها یک بخش طیف برای انتقال آن کافی است. به این ترتیب درخواست ترافیک

^۲ Line

^۱ Occupancy



شکل ۲. نمایش گراف شبکه به همراه طول‌موج‌های آزاد آن.

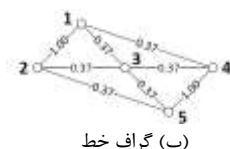
برای این موضوع، شکل (۲) را در نظر بگیرید که یک گراف شبکه را به همراه طول‌موج‌های آزاد روی فیبرهای آن نشان می‌دهد. با بررسی طول‌موج‌ها مشخص است که s_6 آزادترین طول‌موج بوده و بر روی چهار پیوند شبکه آزاد است. پس از آن s_4 قرار داشته که روی سه پیوند آزاد است. اما نکته‌ای که باید در نظر گرفت این است که توپولوژی هرس شده از طریق s_6 تنها قادر به تشکیل مسیر بین جفت گره‌های V_1-V_2 ، V_3-V_4 ، V_7-V_8 و V_5-V_6 است؛ در صورتی که توپولوژی هرس شده بر اساس s_4 قادر به تشکیل مسیر بین جفت گره‌های V_1-V_2 ، V_3-V_4 ، V_7-V_8 ، V_5-V_6 و V_3-V_7 خواهد بود. واضح است که s_4 از نظر تعداد مسیرهای قابل تشکیل بین گره‌های شبکه و پاسخ‌دهی به درخواست‌های ترافیک، انتخاب مناسب‌تری نسبت به s_6 است در حالی که تعداد پیوندهای کمتری از آن در شبکه آزاد است.

دلیل این موضوع به نحوه‌ی قرارگیری پیوندهای آزاد یک طول‌موج برمی‌گردد. در گراف شبکه‌ی شکل (۲)، پیوندهایی که s_6 روی آن‌ها آزاد است، به صورت پراکنده در شبکه قرار گرفته‌اند. در صورتی که پیوندهای آزاد s_4 به شکل مجتمع و در کنار یکدیگر قرار گرفته و پیوستگی بین آن‌ها باعث ایجاد مسیرهای بیشتری بین گره‌ها می‌شود. بنابراین، پیوستگی بین پیوندهای آزاد طول‌موج‌ها عامل مناسبی برای تعیین ترتیب طول‌موج‌ها خواهد بود.

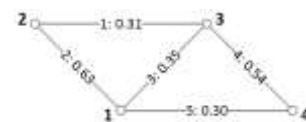
دقت شود که استفاده از یک ترتیب متغیر با وضعیت شبکه، با وجود بهبود تأخیر پاسخ‌دهی، ممکن است احتمال انسداد درخواست‌ها را افزایش دهد. زیرا استفاده از یک ترتیب از پیش تعیین‌شده باعث قرار گرفتن درخواست‌های ترافیک در طول‌موج‌های ابتدایی این ترتیب شده که این موضوع زمان به اشباع رسیدن شبکه را به عقب انداخته و احتمال انسداد درخواست‌ها را کاهش می‌دهد. به همین دلیل انتظار می‌رود که استفاده از یک ترتیب متغیر با وضعیت شبکه باعث افزایش احتمال انسداد شود.

۳-۲. بهبود انتخاب طول‌موج با پردازش سیگنال گرافی

در بخش قبل متوجه شدیم که پیوستگی بین پیوندهای آزاد طول‌موج‌ها می‌تواند معیار مناسبی جهت سنجش وضعیت آن‌ها باشد. در این راستا، GSP می‌تواند به بهبود روند انتخاب طول‌موج‌ها کمک کند. برای بهره‌گیری از GSP در تعیین ترتیب بررسی طول‌موج‌ها، بردار اشغال طول‌موج s_j را به شکل بردار $h_j =$



(ب) گراف خط



(ا) گراف شبکه

شکل ۱. نمایش گراف شبکه و گراف خط متناظر آن.

۳-۲. چالش‌های روش هرس توپولوژی

یکی از روش‌های تک‌مرحله‌ای حل مسئله‌ی RWA هرس توپولوژی نام دارد که در بخش ۲ آن را مرور کردیم. در این روش، ابتدا طول‌موج‌های شبکه شماره‌گذاری شده و در هنگام پاسخ‌دهی به درخواست‌های ترافیک، به ترتیب همین شماره‌گذاری مورد بررسی قرار می‌گیرند. با ورود هر درخواست ترافیک به شبکه، اولین طول‌موج انتخاب شده و تمامی فیبرهایی که این طول‌موج روی آن آزاد نیست، از گراف شبکه حذف می‌شوند که به آن هرس توپولوژی می‌گویند. حال با اجرای یک الگوریتم کوتاه‌ترین مسیر روی این گراف هرس شده، مسیری برای انتقال ترافیک به دست می‌آید. در صورت یافت نشدن مسیر بر روی گراف هرس شده، متوجه می‌شویم که این طول‌موج برای تخصیص به درخواست ترافیک مناسب نیست. حال طول‌موج دوم را در نظر گرفته و همین مراحل را روی آن تکرار می‌کنیم. این روند را تا زمان پیدا شدن یک مسیر مناسب برای درخواست ترافیک ادامه می‌دهیم.

در این روش، به دلیل آنکه در هنگام پاسخ‌دهی به درخواست، وضعیت طول‌موج‌ها بر روی شبکه بررسی نشده و صرفاً بر اساس یک ترتیب از پیش تعیین‌شده برای تخصیص به ترافیک انتخاب می‌شوند، عدم تناسب طول‌موج‌های ابتدایی این ترتیب برای تخصیص به درخواست محتمل است. این موضوع باعث تأخیر در پاسخ‌دهی به درخواست‌های ترافیک می‌شود که با توجه به صورت پویای مسئله و ورود درخواست‌های ترافیک به شبکه به صورت متوالی و بافاصله‌های زمانی اندک، می‌تواند عملکرد شبکه را در پاسخ‌دهی به درخواست‌ها تحت تأثیر قرار دهد.

حال به منظور بهبود عملکرد این الگوریتم از نظر تأخیر در پاسخ‌دهی به درخواست‌های ترافیک، بهتر است انتخاب طول‌موج‌ها به شکل هوشمندانه‌تری انجام شود و با در نظر گرفتن وضعیت طول‌موج‌ها در زمان پاسخ‌دهی به ترافیک، ترتیب جدیدی برای بررسی آن‌ها تعیین شود. در نگاه ساده، هر چه یک طول‌موج روی تعداد فیبرهای بیشتری آزاد باشد، انتخاب مناسب‌تری برای تخصیص به درخواست ترافیک خواهد بود اما همیشه چنین نیست.

توپولوژی را در دو مرحله تصویر می‌کنیم. در مرحله اول، درجه‌های گره‌ها از طریق یک تبدیل خطی به بازه‌ی صفر و یک تصویر می‌شود. هدف از این کار، یکسان کردن شرایط تمامی گراف‌های توپولوژی است و تبدیل خطی ابزاری ساده و درعین حال مناسب برای انجام این کار است. در مرحله بعد مطابق توصیفات بند قبل، درجه‌های نرمال شده را به این شکل تصویر می‌کنیم که وزن متناظر گره‌های مشترک با درجه‌ی کمتر در گراف خط، بیشتر از وزن متناظر گره‌های مشترک با درجه‌ی بیشتر باشد. همچنین از آنجاکه تفاوت چندان بین درجه‌های بالا از نظر میزان ناهمواری وجود ندارد، باید از تابعی استفاده کنیم که مقادیر بزرگ‌تر درجه را فشرده‌تر کرده و بین آن‌ها تمایز کمتری ایجاد کند. با این تفاسیر، تابع‌نمایی با توان منفی در عین سادگی، شرایط موردنظر ما را برقرار می‌کند. به این ترتیب، وزن‌های گراف خط تعیین می‌شوند.

تاکنون نشان داده شد که ساختار گراف پایه، همان گراف خط بوده و سیگنال گرافی موردنظر، بردار اشغال طول موج است. علاوه بر این مشخص شد که پیوستگی پیوندهای آزاد یک طول موج که معیار مناسبی برای انتخاب یک طول موج در تخصیص به ترافیک است، با مفهوم همواری سیگنال گرافی ارتباط تنگاتنگی دارد. حال باید روشی برای اندازه‌گیری میزان همواری سیگنال گرافی پیدا کرد.

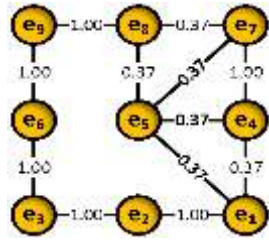
در بخش قبل، مفهوم فرکانس گرافی و ارتباط آن با همواری و نوسان سیگنال گرافی ارائه شد و مشخص شد که اگر از ماتریس لاپلاسیان به عنوان عملگر جابه‌جایی گرافی استفاده شود، همواری یک سیگنال گرافی معادل با پایین‌گذر بودن آن خواهد شد. با در نظر گرفتن این موضوع، می‌توان به راحتی متوجه شد که توان فرکانس‌های پایین یک سیگنال گرافی، متناظر با میزان همواری آن سیگنال خواهد بود. به این منظور، ابتدا GFT سیگنال گرافی اشغال طول موج را محاسبه کرده و سپس با جمع زدن مربع اندازه‌ی چندین مؤلفه‌ی فرکانس پایین این سیگنال، توان فرکانس پایین آن به دست می‌آید که معیاری از میزان همواری سیگنال گرافی است.

نکته‌ی قابل توجه در مورد فرکانس گرافی این است که کوچک‌ترین فرکانس (با فرض استفاده از ماتریس لاپلاسیان) برابر صفر بوده و بردار ویژه‌ی متناظر آن بردار ثابت است. در واقع، مؤلفه‌ی اول GFT سیگنال گرافی اشغال طول موج که از ضرب بردار ثابت در سیگنال گرافی حاصل می‌شود، برابر ضرب حاصل جمع مقادیر این سیگنال بوده و متناسب با تعداد پیوندهایی است که این طول موج روی آن‌ها آزاد است. به زبان دیگر، اگر تنها به مؤلفه‌ی اول GFT برای محاسبه‌ی توان فرکانس پایین اکتفا کنیم، معیار به دست آمده برای یک طول موج دقیقاً متناظر با تعداد پیوندهای آزاد آن طول موج است. در صورتی که

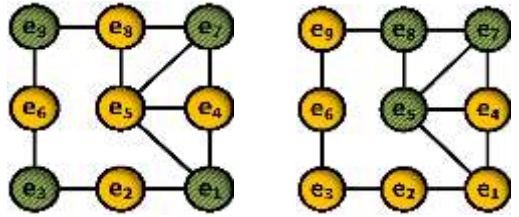
$[h_{j,i}]_{i=1, \dots, M}$ تعریف می‌کنیم که در آن $h_{j,i} = f_{ij}$ است. واضح است که این بردار برابر ستون j -ام ماتریس F است و وضعیت طول موج s_j را بر روی تمام پیوندهای شبکه نشان می‌دهد. با در نظر گرفتن گراف خط متناظر گراف شبکه، متوجه می‌شویم که بردار اشغال طول موج، یک سیگنال گرافی را روی گراف خط تشکیل می‌دهد که مقدار این سیگنال در هر پیوند گراف خط، آزاد بودن این طول موج را بر روی این پیوند در گراف شبکه نشان می‌دهد. همچنین، مفهوم پیوستگی پیوندهای آزاد یک طول موج که نقش مهمی در انتخاب طول موج مناسب برای تخصیص به ترافیک دارد، بسیار شبیه به مفهوم همواری سیگنال گرافی اشغال این طول موج در گراف خط است. زیرا پیوندهای دارای گره مشترک در گراف شبکه، همسایه‌ی یکدیگر در گراف خط هستند و اگر این پیوندهای مجاور برای یک طول موج آزاد باشند، سیگنال گرافی اشغال این طول موج برای همه‌ی این پیوندها در گراف خط یک شده و همین موضوع باعث همواری سیگنال گرافی اشغال طول موج می‌شود. به عبارت دیگر، هر چه سیگنال گرافی اشغال یک طول موج هموارتر باشد، آن طول موج انتخاب مناسب‌تری برای تخصیص به ترافیک خواهد بود.

در تعیین میزان همواری سیگنال گرافی اشغال طول موج باید به نکته‌ی دیگری نیز توجه کرد. در این راستا، دو گره را در گراف شبکه در نظر بگیرید که یکی تنها به دو گره دیگر متصل بوده و دیگری با چهار گره دیگر همسایه است. حال اگر مسیر عبور یک ترافیک از این گره‌ها بگذرد، در گره اول چون تنها دو پیوند به آن متصل است، هر دو پیوند باید دارای یک طول موج آزاد باشند. در واقع، سیگنال گرافی اشغال این طول موج حتماً باید در این دو پیوند مقدار یک را داشته باشد و وجود ناهمواری بین این دو مقدار باعث عدم امکان تخصیص این طول موج به ترافیک می‌شود. اما در گره دوم، نیازی به آزاد بودن یک طول موج بر روی هر چهار پیوند متصل به گره نیست و اگر روی دو پیوند آزاد باشد، این طول موج قابلیت تخصیص به ترافیک را داشته و ترافیک از یک پیوند آزاد وارد و از پیوند آزاد دیگر خارج می‌شود. در این حالت، سیگنال گرافی اشغال طول موج برای دو پیوند آزاد و دو پیوند اشغال شده مقدار متفاوتی داشته و در نتیجه، باعث ناهمواری سیگنال گرافی می‌شود؛ در صورتی که این ناهمواری با ناهمواری سیگنال گرافی برای دو پیوند متصل به گره اول تفاوت داشته و اثر کمتری در عدم تناسب طول موج برای تخصیص به ترافیک دارد. بنابراین در گراف خط، وزن یال بین دو پیوند متصل به گره اول باید بیشتر از وزن یال‌های بین پیوندهای متصل به گره دوم باشد تا اثر ناهمواری آن‌ها تضعیف شود.

در بخش قبل، انتخاب وزن یال‌های گراف خط بر این اساس انجام گرفته است که تفاوت میزان اثر ناهمواری‌ها در دو حالت با درجه‌ی گره مشترک مختلف لحاظ شود. در این راستا برای به دست آوردن وزن یال‌های گراف خط، درجه‌ی گره‌های گراف



شکل ۳. نمایش گراف خط متناظر گراف شبکه‌ی شکل (۲).



شکل ۴. نمایش سیگنال گرافی اشغال طول موج. (ب) بردار اشغال طول موج s_6 (ا) بردار اشغال طول موج s_4

جدول ۱. معیار میزان همواری طول موج‌ها در گراف شبکه‌ی شکل (۳).

طول موج	۱	۲	۳	۴	۵	۶	۷	۸	۹
معیار	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰

الگوریتم RWA ارائه شده مبتنی بر هرس توپولوژی به ترتیب هموارترین در الگوریتم ۱ آمده است. دقت شود که دو خط اول الگوریتم فقط یک بار نیاز به محاسبه داشته و در سایر اجراهای این الگوریتم، از همان مقدار محاسبه شده‌ی U در اجرای اول استفاده می‌شود. علاوه بر آن، مدت زمان خدمت ترافیک در زمان اختصاص منابع به آن اثری نداشته و در صورت عدم انسداد درخواست، این درخواست به همراه زمان اتمام آن به لیست درخواست‌های موجود در شبکه اضافه می‌شود. حال به صورت هم‌زمان با پاسخ‌دهی به درخواست‌های ترافیک، وضعیت درخواست‌های موجود در شبکه نیز بررسی شده و اگر زمان خدمت آن‌ها به پایان رسیده باشد، منابع تخصیص یافته به آن‌ها آزاد شده و ماتریس F به روز می‌شود.

الگوریتم ۱. GSS-RWA

ورودی: گراف شبکه‌ی $G = (V, E, S, W, F)$ و درخواست ترافیک RQ $= (o, d, \tau)$

خروجی: پاسخ درخواست $RS = (p, \lambda)$

- ۱: ماتریس A و L را حساب کن.
- ۲: ماتریس U را از طریق تجزیه‌ی ویژه‌ی L به دست آور.
- ۳: بردار معیار m را طبق رابطه‌ی (۳) محاسبه کن.
- ۴: بردار m را به صورت نزولی مرتب کن و ترتیب اعضای m را در بردار ord قرار بده.
- ۵: z را برابر یک قرار بده.
- ۶: تا وقتی z بزرگ‌تر از C نیست:
- ۷: λ را برابر $S_{ord(j)}$ قرار بده.
- ۸: پیوندهای اشغال شده‌ی λ را از E حذف کن و پیوندهای باقی‌مانده را در E_λ قرار بده.

بالتر نشان دادیم این معیار همیشه باعث انتخاب طول موج مناسب نخواهد شد. به همین دلیل، در محاسبه‌ی معیار انتخاب طول موج، ضریبی (کوچک‌تر از یک) از مؤلفه‌ی اول GFT را در کنار سایر مؤلفه‌ها در نظر می‌گیریم تا اثر پیوستگی پیوندهای آزاد طول موج بر اثر تعداد پیوندها غلبه کند.

بنابراین، معیار مرتب‌سازی طول موج‌ها چنین محاسبه می‌شود:

$$(2)$$

$$\hat{h}_j = U^T h_j, \quad m_j = |r\hat{h}_{j,1}|^2 + |\hat{h}_{j,2}|^2 + \dots + |\hat{h}_{j,R}|^2$$

که در آن U ماتریس متعامد یک‌به‌یک بردارهای ویژه‌ی حاصل از تجزیه‌ی ویژه‌ی ماتریس لاپلاسیان گراف خط، \hat{h}_j برابر با GFT بردار اشغال طول موج s_j ، R تعداد مؤلفه‌های فرکانس پایین انتخاب شده، معیار متناظر با طول موج s_j و r ضریب به کاررفته برای تضعیف اولین مؤلفه‌ی فرکانس است. از آنجاکه بردارهای اشغال طول موج، همان ستون‌های ماتریس اشغال هستند، می‌توان معیار تمامی طول موج‌ها را به صورت تجمیعی محاسبه کرد و داریم:

$$(3)$$

$$\hat{F} = U^T F, \quad m = r^2 (|\hat{F}_1| \odot \hat{F}_1| + |\hat{F}_2| \odot \hat{F}_2| + \dots + |\hat{F}_R| \odot \hat{F}_R|)$$

که در آن \hat{F} ماتریس حاصل از کنار هم قرار دادن بردارهای \hat{h}_j با ابعاد M در C، m بردار معیار تمامی طول موج‌ها، \hat{F}_i سطر i-ام ماتریس \hat{F} و \odot عملیات ضرب درایه به درایه را نشان می‌دهد. حال طول موج‌ها به ترتیب اندازه‌ی معیارشان در بردار m برای تخصیص به ترافیک بررسی می‌شوند.

شکل (۳)، گراف خط متناظر گراف شبکه‌ی شکل (۲) را

نشان می‌دهد. با توجه به گراف شبکه، درجه‌ی گره‌های v_4, v_5, v_6, v_7, v_8 و v_9 برابر دو و سایر گره‌ها برابر سه است. با تصویر کردن این اعداد به بازه‌ی صفر و یک، درجه‌ی دو به صفر و درجه‌ی سه به یک تغییر پیدا می‌کند. در نهایت با اعمال تابع‌نمایی منفی، وزن‌های شکل (۳) به دست می‌آید. همچنین سیگنال گرافی اشغال دو طول موج s_4 و s_6 در شکل (۴) نمایش داده شده است. در این شکل، دایره‌های سبزرنگ هاشور خورده و دایره‌های زردرنگ ساده، به ترتیب نشان‌دهنده‌ی آزاد یا اشغال بودن طول موج متناظر بر روی پیوندهای گراف شبکه است. همان‌طور که مشخص است، مقادیر سیگنال گرافی اشغال طول موج s_4 در حوالی یال‌های سنگین گراف خط، شبیه یکدیگر بوده و سیگنال هموارتر است. در صورتی برای s_6 سیگنال گرافی متناظرش نوسانات زیادی داشته و ناهموار است. نتایج اعمال معیار بالا با پارامترهای $r = 0.1$ و $R = 3$ به گراف شکل (۲)، در جدول (۱) آمده است. همان‌طور که انتظار می‌رفت، طول موج s_4 و پس از آن s_7 به دلیل پیوستگی سیگنال گرافی اشغال آن‌ها، در اولویت بالاتری نسبت به سایر طول موج‌ها قرار می‌گیرند.

بررسی‌ها نشان داده است که الگوریتم FAFP، نتایج مناسبی از نظر احتمال انسداد، تأخیر پاسخ‌دهی و پیچیدگی زمانی ارائه می‌دهد و در بسیاری از پژوهش‌ها به‌عنوان معیار مقایسه در نظر گرفته می‌شود [۱۵]. در این شبیه‌سازی، K برابر ۳ در نظر گرفته می‌شود.

در این پژوهش، برای مقایسه‌ی الگوریتم‌های متفاوت از سه معیار ارزیابی استفاده می‌شود که به شرح زیر است:

- احتمال انسداد درخواست^۲: این معیار برابر با نسبت تعداد درخواست‌های مسدود شده توسط الگوریتم به تعداد کل درخواست‌های وارد شده به شبکه است. درخواست محدود شده به درخواستی گفته می‌شود که به دلیل نبود منابع کافی در شبکه، امکان انتقال و تخصیص مسیر و طول موج مناسب برای آن وجود ندارد. طبیعتاً هرچه مقدار این معیار کمتر باشد، توانایی الگوریتم در کنترل منابع شبکه و تخصیص بهینه‌ی آن بالاتر است.

- میزان استفاده از طیف^۳: این معیار میزان استفاده‌ی الگوریتم از منابع شبکه و توانایی آن در مدیریت مقدار منابع مصرفی را نشان می‌دهد. محاسبه‌ی این معیار به این شکل انجام می‌شود که برای همه‌ی درخواست‌های ترافیک پاسخ‌داده شده، متوسط میزان استفاده‌ی ترافیک از منابع شبکه را با یکدیگر جمع می‌زنیم. در مسئله‌ی RWA، متوسط میزان استفاده از منابع شبکه برای i -امین درخواست که به شکل (τ_i, d_i, o_i) بوده و با منابع (λ_i, p_i) پاسخ‌داده شده، به صورت $\sum_{i=1}^{NR} \frac{l(p_i) \cdot \tau_i}{M.C.T}$ محاسبه می‌شود که در آن M، C، T و NR به ترتیب تعداد پیوندهای شبکه، تعداد بخش‌های طیف، مدت‌زمان بررسی شبکه و تعداد درخواست‌های ترافیک است.

- زمان پردازش درخواست^۴: این معیار میزان تأخیر پاسخ‌دهی الگوریتم به درخواست‌های ترافیک را نشان داده و برابر متوسط بازه‌ی زمانی بین شروع بررسی یک درخواست و مشخص شدن وضعیت آن خواهد بود. منظور از وضعیت یک درخواست انسداد و یا تخصیص منابع لازم به آن است. دقت شود که این زمان دقیقاً برابر زمان واقعی بوده و ارتباطی با واحد زمان مطرح شده در شبیه‌سازی ندارد. به عبارت دیگر، این معیار نشان‌دهنده‌ی پیچیدگی الگوریتم بوده و میزان کارآمدی آن را برای کاربردهای عملی در شبکه مشخص می‌کند. برای محاسبه‌ی این زمان، از دستورهای tic و toc با دقت اندازه‌گیری در حدود یک میکروثانیه استفاده می‌کنیم.

است. بنابراین، تمامی درخواست‌های ترافیک ورودی به این شبکه را می‌توان با اختصاص یک کانال طول‌موج منتقل کرد.

حال پارامترهای مورد استفاده در دو روش ارائه شده بررسی می‌شود. در روش اول، دو پارامتر r و R به ترتیب به‌عنوان ضریب تضعیف فرکانس صفر و تعداد مؤلفه‌های انتخابی فرکانس پایین نیاز به مقداردهی دارد. در شبیه‌سازی‌های انجام شده، مقدار آن‌ها به ترتیب برابر $0/1$ و 3 در نظر گرفته شده است.

در این پژوهش، شبیه‌سازی به‌ازای مقادیر بار ۱۰۰ تا ۵۰۰ ارلانگ و بافاصله‌ی ۲۵ انجام شده است. برای بررسی وضعیت شبکه در شرایط پایدار، همه‌ی شبیه‌سازی‌ها با تعداد درخواست ۱۰۰,۰۰۰ اجرا شده است. همچنین زمان ورود آخرین درخواست مدت‌زمان بررسی شبکه را مشخص می‌کند که تقریباً برابر حاصل ضرب تعداد درخواست‌ها در متوسط فاصله‌ی زمانی دو درخواست است. دقت شود که مدت‌زمان بررسی شبکه متفاوت از مدت‌زمان واقعی اجرای شبیه‌سازی است. زمان اول بر اساس واحد زمانی معرفی شده در شبیه‌سازی (زمان خدمت ترافیک) بوده در حالی که زمان دوم بر اساس واحد زمانی واقعی (ثانیه) است. تمامی شبیه‌سازی‌ها بر روی سیستم با مشخصات ۱۶ GB RAM و پردازنده‌ی Intel(R) Core(TM) i7-7700HQ @ ۲.۸۰ GHz و از طریق نرم‌افزار MATLAB انجام شده است.

در این شبیه‌سازی، روش پیشنهادی GSS-RWA یا روش مبتنی بر Smooth Pruning با دو الگوریتم Fixed Pruning و Free Pruning مقایسه شده است. Fixed Pruning نسخه‌ی اصلی روش هرس توپولوژی است که در آن از ترتیب ثابتی برای بررسی طول‌موج‌ها استفاده می‌شود. روش Free Pruning مشابه روش ارائه شده است، با این تفاوت که طول‌موج‌ها را به ترتیب میزان آزاد بودن آن‌ها در شبکه بررسی می‌کند. هدف از مقایسه‌ی این روش، بررسی اثر معیار سنجش تناسب ارائه شده با معیار آزادترین طول‌موج است. علاوه بر این دو روش، الگوریتم GSS-RWA با یکی از روش‌های رایج و درعین حال کارای حل مسئله‌ی RWA، یعنی الگوریتم جایگزین ثابت / اولین برآزش یا FAFP^۱ مقایسه شده است. این الگوریتم یکی از روش‌های تجربی بوده که در آن دو زیر مسئله‌ی مسیریابی و تخصیص طول‌موج به‌صورت جداگانه بررسی می‌شوند. در مسیریابی جایگزین ثابت، ابتدا K کوتاه‌ترین مسیر بین گره‌های مبدأ و مقصد محاسبه شده و در هنگام پاسخ‌دهی به درخواست‌های ترافیک، تنها از یکی از این مسیرها استفاده خواهد شد. در روش تخصیص طول‌موج اولین برآزش، طول‌موج‌ها شماره‌گذاری شده و سپس برای پاسخ‌دهی به درخواست ترافیک، از بین طول‌موج‌هایی که مسیر ترافیک روی آن آزاد است، طول‌موج با کوچک‌ترین شماره انتخاب می‌شود.

^۲ Request Blocking Probability (RBP)

^۳ Spectrum Utilization (SPU)

^۴ Request Process Time (RPT)

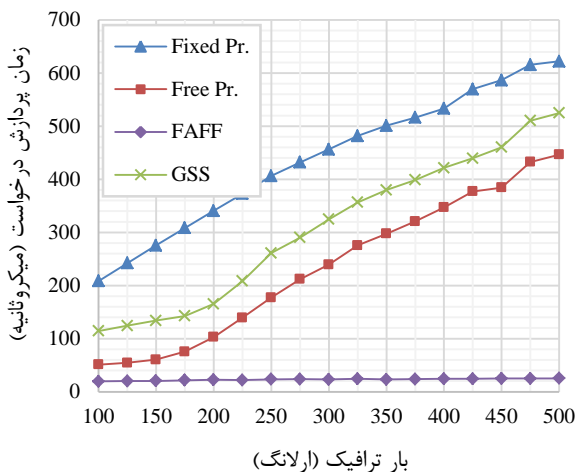
^۱ Fixed Alternate / First Fit

۲-۴. نتایج شبیه‌سازی

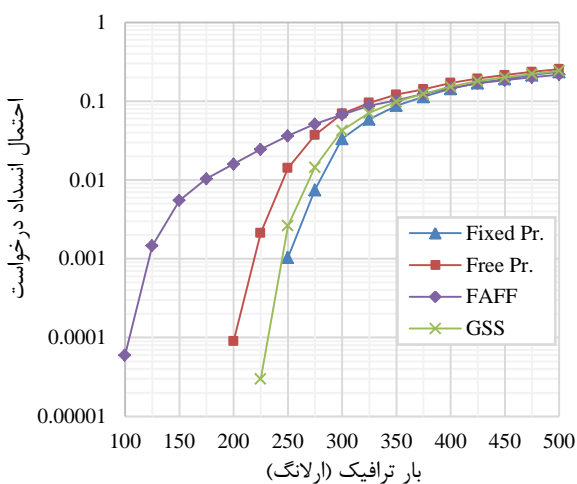
در این بخش، نتایج شبیه‌سازی ارائه شده و تحلیل آن‌ها انجام شده است. نتایج شبیه‌سازی در شکل‌های (۷-۱۲) و مقایسه‌ی نسبی نتایج در جدول (۲) نشان داده شده است.

جدول ۲. مقایسه‌ی نسبی (درصد) GSS با Fixed Pr.، Free Pr. و FAFF

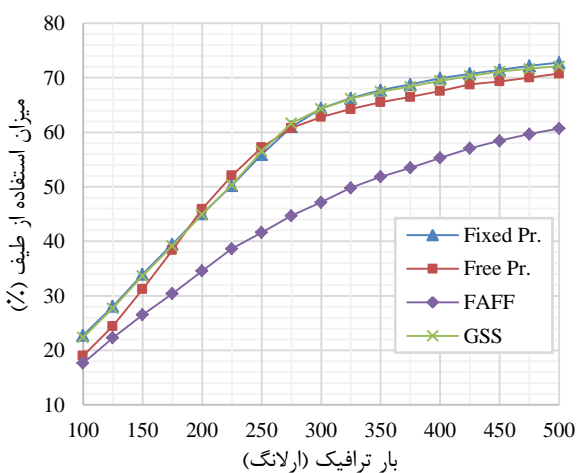
USBNET			NSFNET			معیار
FAFF	Free Pr.	Fixed Pr.	FAFF	Free Pr.	Fixed Pr.	
-۴۶	-۳۶	+۱۰	-۱۶	-۲۹	+۱۸	RBP
+۲۸	+۳	ناچیز	+۱۱	ناچیز	ناچیز	SPU
+۱۲۳۰	+۷۳	-۳۴	+۱۲۱۱	+۵۱	-۳۹	RPT



شکل ۹. نمودار زمان پردازش درخواست در توپولوژی NSFNET

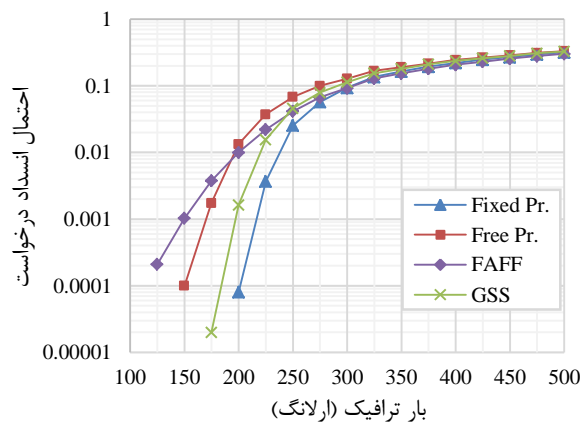


شکل ۱۰. نمودار احتمال انسداد درخواست در توپولوژی USBNET

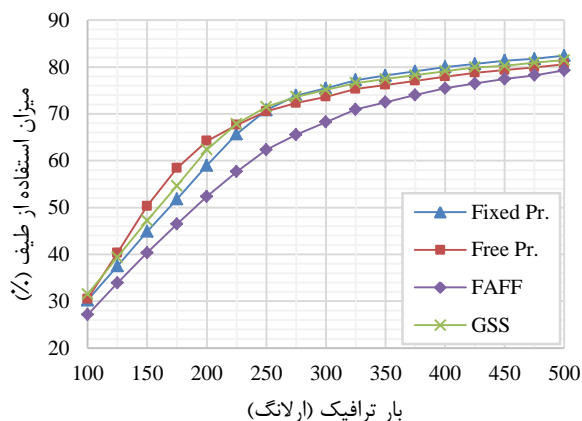


شکل ۱۱. نمودار میزان استفاده از طیف در توپولوژی USBNET

در این جدول، اعداد به کاررفته نشان‌دهنده‌ی تفاوت نسبی روش موردبررسی با الگوریتم‌های دیگر است. برای مثال، عدد +۱۸ در معیار احتمال انسداد درخواست و در مقایسه با Fixed Pruning، نشان‌دهنده‌ی بیشتر بودن احتمال انسداد در روش Smooth Pruning به اندازه‌ی ۱۸ درصد است. همچنین عبارت ناچیز در جدول، به معنی اختلاف نسبی کمتر از یک درصد است. در ادامه، مقایسه‌ی نتایج الگوریتم Smooth Pr. یا GSS-RWA با Fixed Pr. و Free Pr. ارائه می‌شود.



شکل ۷. نمودار احتمال انسداد درخواست در توپولوژی NSFNET



شکل ۸. نمودار میزان استفاده از طیف در توپولوژی NSFNET

این موضوع باعث انتخاب مسیر با طول بیشتری می‌شود. به همین دلیل میزان استفاده از طیف Fixed Pruning بیشتر است.

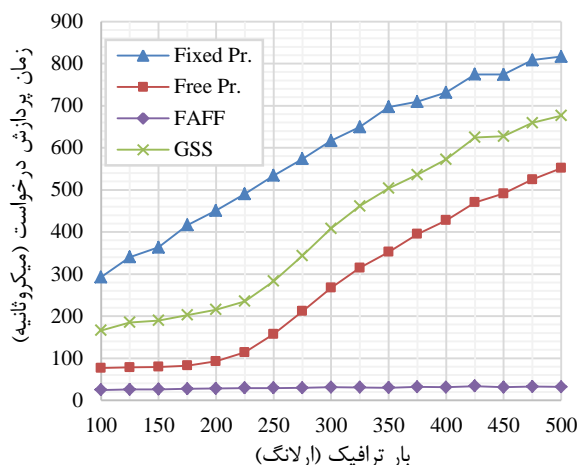
Smooth Pruning نیز به علت آنکه در انتخاب طول موج تنها پیوستگی را مدنظر قرار می‌دهد، لزومی به انتخاب آزادترین طول موج نداشته و این موضوع ممکن است منجر به انتخاب کوتاه‌ترین مسیرهای ممکن نشود اما از آنجاکه پیوستگی طول موج را در شبکه مدنظر قرار می‌دهد، مسیرهای بسیار طولانی را برای انتقال ترافیک انتخاب نمی‌کند. به همین دلیل میزان استفاده از طیف آن بین دو الگوریتم دیگر است.

در بعضی از مقادیر پایین بار و به خصوص در مقادیر نزدیک به نقطه‌ی اشباع (نقطه‌ی تغییر شیب نمودار میزان استفاده از طیف)، با توجه به آزاد بودن بخش زیادی از منابع شبکه، در اکثر طول موج‌ها کوتاه‌ترین مسیر ممکن انتخاب می‌شود. در این حالت، Fixed Pruning که مدیریت تخصیص منابع بهتری دارد، باعث کاهش میزان استفاده از طیف می‌شود. زیرا این روش با اولویت بیشتری از طول موج‌های اولیه برای تخصیص منابع استفاده می‌کند و باعث می‌شود که طول موج‌های انتهایی ترتیب کاملاً آزاد بمانند.

همچنین در مقایسه‌ی وضعیت دو شبکه، مشخص است که نقطه‌ی اشباع در شبکه‌ی NSFNET برابر ۲۵۰ ارلانگ و در شبکه‌ی USBNET برابر ۳۰۰ ارلانگ است که نشان از ظرفیت بالاتر شبکه‌ی USBNET نسبت به NSFNET دارد و در مقدار بار بیشتری شبکه به اشباع می‌رسد.

شکل‌های (۹) و (۱۲)، نمودار زمان پردازش درخواست را در مقادیر مختلف بار ترافیک شبکه، به ترتیب در دو توپولوژی NSFNET و USBNET نمایش می‌دهند. در شبکه‌ی NSFNET، الگوریتم Smooth Pruning از نظر زمان پردازش درخواست، ۳۹ درصد عملکرد بهتری نسبت به Fixed Pruning و ۵۱ درصد عملکرد ضعیف‌تری نسبت به Free Pruning نشان می‌دهد. همچنین در شبکه‌ی USBNET، الگوریتم Smooth Pruning از نظر زمان پردازش درخواست، ۳۴ درصد عملکرد بهتری نسبت به Fixed Pruning و ۷۳ درصد عملکرد ضعیف‌تری نسبت به Free Pruning دارد. همچنین در زمینه‌ی تفاوت این دو شبکه از نظر زمان پردازش درخواست، شبکه‌ی USBNET به علت ابعاد بزرگ تر و منابع بیشتر آن، در پردازش یک درخواست، تأخیر بیشتری نسبت به شبکه‌ی NSFNET ایجاد می‌کند.

به این ترتیب و با در نظر گرفتن نتایج مربوط به احتمال انسداد و زمان پردازش، مشاهده می‌شود که Smooth Pruning عملکردی بین دو الگوریتم دیگر داشته و مصالحه‌ای بین تأخیر در پاسخ‌دهی و احتمال انسداد درخواست ایجاد کرده و با افزایش اندک احتمال انسداد، زمان پردازش را به میزان قابل توجهی کاهش می‌دهد؛ موضوعی که در زمان طراحی الگوریتم Smooth



شکل ۱۲. نمودار زمان پردازش درخواست در توپولوژی USBNET.

شکل‌های (۷) و (۱۰)، نمودار احتمال انسداد درخواست را در مقادیر مختلف بار ترافیک شبکه، به ترتیب در دو توپولوژی NSFNET و USBNET نمایش می‌دهند. در شبکه‌ی NSFNET، الگوریتم Smooth Pruning از نظر احتمال انسداد، ۱۸ درصد عملکرد ضعیف‌تری نسبت به Fixed Pruning و ۲۹ درصد عملکرد بهتری نسبت به Free Pruning دارد. همچنین در شبکه‌ی USBNET، الگوریتم Smooth Pruning از نظر احتمال انسداد، ۱۰ درصد عملکرد ضعیف‌تری نسبت به Fixed Pruning و ۳۶ درصد عملکرد بهتری نسبت به Free Pruning نشان می‌دهد.

نکته‌ی قابل توجه در مورد تفاوت نتایج شبیه‌سازی این دو شبکه، اختلاف خروجی‌های به دست آمده در بار یکسان است. شبکه‌ی USBNET به دلیل تعداد پیوندهای بیشتر و ابعاد بزرگ‌تر، طبیعتاً منابع بیشتری در اختیار دارد. به همین علت، در میزان بار یکسان عملکرد بهتری از نظر احتمال انسداد به جای می‌گذارد.

شکل‌های (۸) و (۱۱)، نمودار میزان استفاده از طیف را در مقادیر مختلف بار ترافیک، به ترتیب در دو توپولوژی NSFNET و USBNET نمایش می‌دهند. با دقت در این دو شکل، مشخص است که میزان استفاده از طیف هر سه الگوریتم در هر دو شبکه، بسیار نزدیک به یکدیگر بوده و اما تفاوت‌های ناچیزی با یکدیگر دارند.

الگوریتم Free Pruning، در اکثر مقادیر بار، با انتخاب آزادترین طول موج در شبکه باعث می‌شود که در توپولوژی هرس شده تعداد پیوندهای بیشتری در دسترس باشد و با احتمال بالایی مسیری با تعداد پیوند کمتر برای انتقال ترافیک انتخاب شود. از این رو، Free Pruning درصد کمتری از منابع را اشغال می‌کند.

Fixed Pruning تمامی طول موج‌ها را با صرف نظر از وضعیت اشغال آن‌ها بررسی کرده و اولین طول موجی را که روی آن مسیری برای انتقال ترافیک یافت شود، انتخاب می‌کند. از آنجاکه وضعیت اشغال این طول موج‌ها در نظر گرفته نمی‌شود، توپولوژی هرس شده‌ی متناظر آن‌ها ممکن است تعداد پیوند کمی داشته باشد و

GSS، پس از آن هر طول موج، یک الگوریتم کوتاه‌ترین مسیر اجرا می‌شود. همچنین اگر بر روی طول موج انتخابی مسیری یافت نشود، الگوریتم کوتاه‌ترین مسیر مجدداً اجرا می‌شود. هر چه بار شبکه بیشتر باشد، با توجه به اشغال بیشتر منابع شبکه، احتمال یافت نشدن مسیر بیشتر شده و تعداد اجراهای الگوریتم کوتاه‌ترین مسیر افزایش می‌یابد. در صورتی که در روش FAFF، تنها از مسیرهای از پیش محاسبه شده استفاده می‌شود. از این رو، نمودار زمان پردازش درخواست روش GSS با افزایش بار شبکه افزایش یافته و نمودار روش FAFF نسبت به بار شبکه تقریباً ثابت می‌ماند. اما همچنان زمان پردازش هر درخواست در روش GSS کمتر از یک میلی‌ثانیه بوده که عدد بسیار اندکی در موضوعات مخابراتی محسوب شده و محدودیتی از این نظر ایجاد نمی‌کند. بنابراین، کاهش احتمال انسداد الگوریتم GSS-RWA در مقایسه با الگوریتم FAFF، باعث برتری روش ارائه شده می‌شود.

۵. نتیجه‌گیری

در این مقاله، روشی برای نشان دادن قابلیت استفاده از ابزار پردازش سیگنال گرافی در مسائل تخصیص منابع نوری پیشنهاد می‌کنیم. در این روش، پردازش سیگنال گرافی برای ارائه‌ی یک روش نوآورانه به نام GSS-RWA به کار گرفته می‌شود که بر اساس بهره‌گیری مؤثر از مفهوم همواری سیگنال‌های گرافی پایه‌گذاری شده است. عملکرد روش پیشنهادی در دو شبکه‌ی نمونه‌ی استاندارد و در مقایسه با الگوریتم FAFF بررسی شده و نشان داده می‌شود که GSS-RWA قادر است با حفظ عملکرد مناسب از نظر تأخیر پاسخ‌دهی، احتمال انسداد را کاهش دهد؛ موضوعی که در شبکه‌های پویا با درخواست‌های ترافیک بالا امری بسیار حیاتی است. این پژوهش راه را برای استفاده از ابزار پردازش سیگنال گرافی در سایر مسائل تخصیصی منابع نوری هموار می‌کند.

مراجع

- [۱] Simmons, J. M. "Optical Network Design and Planning"; Springer Cham, ۲۰۱۶. doi: ۱۰.۱۰۰۷/۹۷۸-۳-۳۱۹-۰۵۲۲۷-۴
- [۲] Zang, H.; Jue, J. P.; Mukherjee, B. "A Review of Routing and Wavelength Assignment Approaches for Wavelength-Routed Optical WDM Networks"; Opt. Netw. Mag. ۲۰۰۰, ۱(۱), ۴۷-۶۰.
- [۳] Natalino, C.; Panahi, A.; Mohammadiha, N.; Monti, P. "AI/ML-as-a-Service for Optical Network Automation: Use Cases and Challenges [Invited]"; J. Opt. Commun. Netw. ۲۰۲۴, ۱۶(۲), A۱۶۹-A۱۷۹. doi: ۱۰.۱۳۶۴/JOCN.۵۰۰۷۰۶
- [۴] Ortega, A. "Introduction to Graph Signal Processing"; Cambridge University Press, ۲۰۲۲. doi: ۱۰.۱۰۱۷/۹۷۸۱۱۰۸۵۵۲۳۴۹
- [۵] Asadi Ghanbari, A.; Alaee, H.; Mohammadnia, M. "A Multi-Stage Modelling Approach for Allocation of Defense Resources to Invading Targets"; J. Adv. Defense Sci. Technol. ۲۰۲۰, ۱۱(۲), ۱۶۷-۱۷۳ (In Persian). doi: ۲۰.۱۰۰۱.۱۲۶۷۲۹۳۵.۱۳۹۹.۱۱.۲.۵.۶

Pruning مورد بحث قرار گرفت و الگوریتم هرس توپولوژی باهدف کاهش تأخیر پاسخ‌دهی و حفظ عملکرد از نظر احتمال انسداد دچار تغییراتی شد. در ادامه، الگوریتم GSS-RWA را با FAFF مقایسه خواهد شد.

با دقت در شکل‌های (۷) و (۱۰)، می‌توان مشاهده کرد که الگوریتم GSS نسبت به الگوریتم FAFF، ۱۶ درصد در توپولوژی NSFNET و ۴۶ درصد در توپولوژی USBNET، بهتر عمل می‌کند. این موضوع به صورت ویژه در مقادیر پایین بار ترافیک قابل مشاهده بوده اما در مقادیر بالای بار ترافیک، روش FAFF به مقدار بسیار اندکی عملکرد بهتری دارد. دلیل این موضوع به نوع مسیریابی این دو روش برمی‌گردد. زمانی که درصد بالایی از منابع شبکه اشغال شده باشد، ممکن است پیوندهای اشغال شده به گونه‌ای باشند که مسیرهای از پیش محاسبه شده‌ی بین مبدأ و مقصد در روش FAFF در دسترس نباشند اما همچنان بتوان مسیری بین مبدأ و مقصد ترافیک یافت که معمولاً طول بیشتری دارد. در این حالت، روش FAFF درخواست را مسدود کرده اما روش GSS با اختصاص منابع بیشتری، به درخواست ترافیک پاسخ می‌دهد. همین موضوع باعث استفاده‌ی بیشتر از منابع و کاهش ظرفیت شبکه در پاسخ‌دهی به درخواست‌های ترافیک آینده می‌شود.

برخلاف زمان‌های شلوغی شبکه، در مقادیر پایین بار ترافیک که درصد کمی از منابع شبکه اشغال هستند، روش GSS عملکرد بسیار بهتری دارد؛ چراکه در روش GSS با وجود استفاده از مسیرهای طولانی‌تر و تخصیص منابع بیشتر به درخواست، همچنان منابع کافی برای اختصاص به درخواست‌های آینده باقی می‌ماند. از این رو، روش GSS به دلیل محدود نبودن به تعدادی مسیر از پیش محاسبه شده و مسیریابی در لحظه‌ی ورود درخواست، تعداد درخواست بسیار کمی را مسدود می‌کند که همین امر سبب بهبود قابل توجه احتمال انسداد درخواست می‌شود.

با مقایسه‌ی نتایج دو توپولوژی، مشخص است که بهبود حاصل از روش GSS در مقایسه با FAFF، در توپولوژی USBNET بسیار بیشتر بوده که این موضوع را می‌توان با توضیحات بند قبل و در نظر گرفتن این نکته که شبکه‌ی USBNET منابع بیشتری دارد، کاملاً توجیه کرد.

مطابق نمودارهای شکل‌های (۸) و (۱۱) و با استدلالی مشابه معیار احتمال انسداد درخواست، نتیجه می‌شود که روش GSS در مقایسه با روش FAFF، بخش بیشتری از منابع شبکه را درگیر می‌کند.

همچنین با دقت در نمودارهای شکل‌های (۹) و (۱۲) مشخص است که عدم استفاده از مسیرهای از پیش تعیین شده اثر بسیار زیادی در افزایش تأخیر پاسخ‌دهی دارد. زیرا در روش

- [۱۳] Cheung, M.; Shi, J.; Wright, O.; Jiang, L. Y.; Liu, X.; Moura, J. M. F. "Graph Signal Processing and Deep Learning: Convolution, Pooling, and Topology"; *IEEE Signal Process. Mag.* ۲۰۲۰, ۳۷(۶), ۱۳۹-۱۴۹. doi: ۱۰.۱۱۰۹/MSP.۲۰۲۰.۳۰.۱۴۰۹۴
- [۱۴] Lohani, V.; Sharma, A.; Singh, Y. N. "Dynamic Routing and Spectrum Assignment Based on the Consecutive Sub-Channels in Flexible-Grid Optical Networks"; *IEEE Access* ۲۰۲۲, ۱۰, ۱۲۸۳۰۴-۱۲۸۳۶۵. doi: ۱۰.۱۱۰۹/ACCESS.۲۰۲۲.۳۲۲۷۴۳۸
- [۱۵] Chatterjee, B. C.; Sarma, N.; Sahu, P. P.; Oki, E. "Routing and Wavelength Assignment for WDM-Based Optical Networks: Quality-of-Service and Fault Resilience"; *Springer Cham*, ۲۰۱۷. doi: ۱۰.۱۰۰۷/۹۷۸-۳-۳۱۹-۴۶۲۰۳-۵
- [۱۶] Gu, R.; Yang, Z.; Ji, Y. "Machine Learning for Intelligent Optical Networks: A Comprehensive Survey"; *J. Netw. Comput. Appl.* ۲۰۲۰, ۱۵۷, ۱۰۲۵۷۶. doi: ۱۰.۱۰۱۶/j.jnca.۲۰۲۰.۱۰۲۵۷۶
- [۱۷] Pinto-Ríos, J.; Calderón, F.; Leiva, A.; Hermosilla, G.; Beghelli, A.; Bórquez-Paredes, D.; Lozada, A.; Jara, N.; Olivares, R.; Saavedra, G. "Resource Allocation in Multicore Elastic Optical Networks: A Deep Reinforcement Learning Approach"; *Complexity* ۲۰۲۳, ۲۰۲۳(۱), ۴۱۴۰۰۹۴. doi: ۱۰.۱۱۵۵/۲۰۲۳/۴۱۴۰۰۹۴
- [۱۸] Yang, M.; Zhang, Q.; Yao, H.; Gao, R.; Xin, X.; Tian, F.; Feng, W.; Chen, D.; Wang, F.; Tian, Q.; Qian, J. "Bee Colony Optimization Algorithm for Routing and Wavelength Assignment Based on Directional Guidance in Satellite Optical Networks"; *China Commun.* ۲۰۲۳, ۲۰(۷), ۸۹-۱۰۷. doi: ۱۰.۲۳۹۱۹/JCC.fa.۲۰۲۲.۰۸۰۴.۲۰۲۳۰۷
- [۱۹] Vajd, F. S.; Hadi, M.; Bhar, C.; Pakravan, M. R.; Agrell, E. "Dynamic Joint Functional Split and Resource Allocation Optimization in Elastic Optical Fronthaul"; *IEEE Trans. Netw. Serv. Manag.* ۲۰۲۲, ۱۹(۴), ۴۵۰۵-۴۵۱۵. doi: ۱۰.۱۱۰۹/TNSM.۲۰۲۲.۳۱۶۶۱۰۰
- [۲۰] Ahmadi, M.; Hadi, M.; Pakravan, M. R. "Power-Efficient Joint Dynamic Resource Allocation in Virtualized Inter-Data Center Elastic Optical Networks"; *IEEE Access* ۲۰۲۴, ۱۲, ۷۵۰۹۹-۷۵۱۰۹. doi: ۱۰.۱۱۰۹/ACCESS.۲۰۲۴.۳۴۰۶۲۰۶
- [۲۱] Hadi, M.; Pakravan, M. R. "Resource Allocation for Elastic Optical Networks Using Geometric Optimization"; *J. Opt. Commun. Netw.* ۲۰۱۷, ۹(۱۰), ۸۸۹-۸۹۹. doi: ۱۰.۱۳۶۴/JOCN.۹.۱۰.۸۸۹
- [۲۲] Hadi, M.; Pakravan, M. R.; Agrell, E. "Dynamic Resource Allocation in Metro Elastic Optical Networks Using Lyapunov Drift Optimization"; *J. Opt. Commun. Netw.* ۲۰۱۹, ۱۱(۶), ۲۵۰-۲۵۹. doi: ۱۰.۱۳۶۴/JOCN.۱۱.۰۰۰۲۵۰