

ارائه یک طرح مبتنی بر برنامه‌ریزی خطی صحیح برای محافظت مبتنی بر قطعه‌بندی در شبکه‌های نوری کشسان

فاطمه سیفی آتاشگاه^۱، دانشجوی کارشناسی ارشد؛ عبدالرسول قاسمی^۲، دانشیار

۱- دانشکده مهندسی کامپیوتر - دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی - تهران - ایران - f.seifi@ee.kntu.ac.ir

۲- دانشکده مهندسی کامپیوتر - دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی - تهران - ایران - arghasemi@kntu.ac.ir

چکیده: در این مقاله، روش‌های محافظت مسیر مشترک و محافظت قطعه مشترک در شبکه‌های نوری کشسان مورد بررسی و مقایسه قرار می‌گیرد. مسأله در قالب برنامه‌ریزی خطی صحیح مدل‌سازی شده است. هدف کمینه‌کردن یک تابع وزن‌دار از میزان کل ظرفیت یدکی و بیشینه اندیس شیار فرکانسی استفاده‌شده در شبکه است. در روش محافظت قطعه مشترک پیشنهادشده تمام گره‌های شبکه قابلیت تغییر بازه‌ی فرکانسی دارند. در این حالت، مسیر کاری می‌تواند قطعه‌بندی شده و برای هر قطعه، قطعه پشتیبان در نظر گرفت. هر کدام از قطعه‌های یک ارتباط به‌عنوان واحد مستقل و خوددرمان عمل می‌کند. اگر یک لینک از مسیر کاری دچار اشکال شود، تنها قطعه پشتیبان متناظر با لینک آسیب‌دیده فعال می‌شود. در حالتی که گره‌های میانی شبکه قابلیت تغییر طیف نداشته باشند، محافظت مسیر مشترک انجام می‌شود. به دلیل اینکه در قطعه‌بندی مسیر، فاصله فیزیکی هر قطعه و احتمال آسیب‌دیدن هم‌زمان جفت قطعه‌های کاری کمتر است، ظرفیت یدکی مورد نیاز در روش مبتنی بر قطعه‌بندی کمتر از روش محافظت مسیر است. نتایج به‌دست‌آمده از شبیه‌سازی نشان می‌دهد، میزان ظرفیت یدکی کل استفاده‌شده در محافظت مسیر مشترک ۱۴/۵ درصد بیشتر از محافظت قطعه مشترک است. همچنین، محافظت قطعه مشترک در مقایسه با محافظت مسیر مشترک مقاومت بیشتری در برابر آسیب هم‌زمان لینک‌ها دارد.

واژه‌های کلیدی: شبکه‌های نوری کشسان، محافظت قطعه مشترک، مدل‌سازی ILP، قابلیت بقا در شبکه‌های نوری کشسان.

An Integer Linear Programming Based scheme for Segment Based Path Protection in Elastic Optical Networks

F. Seifi Atashgah¹, MSc Student; A. Ghasemi², Associate Professor

1- Faculty of Computer Engineering, K.N. Toosi University of Technology, Tehran, Iran, Email: f.seifi@ee.kntu.ac.ir

2- Faculty of Computer Engineering, K.N. Toosi University of Technology, Tehran, Iran, Email: arghasemi@kntu.ac.ir

Abstract: This paper considers shared backup path protection in comparison with shared segment protection for elastic optical networks. The problem is formulated in an integer linear programming framework. The objective is to minimize the weighted function of the total used spare capacity and the maximal index of frequency slots used in the network. For the proposed shared segment protection scheme we assume that the network nodes are empowered with the frequency spectrum switching capability. Using this capability, we are able to decompose the working path into smaller segments and protect that segments against possible failures. Each segment of a connection behave as a self-healing and independent unit. If one link of working path is subject to any unexpected interruption, the restoration is performed only within the corresponding protection for that segment. In the case that the nodes are not empowered with the frequency spectrum switching capability, we use shared path protection. Since the physical distance of each segment and the possibility of simultaneous failure of segments for a given path is rare, the required spare capacity in the segment based scheme is decreased compared to the path protection. Simulation results show that the total spare capacity used in the shared path protection is 14/5% greater than the proposed shared segment protection scheme. Also, shared segment protection is more resilient against the simultaneous links failure events compared to the path protection.

Keywords: Elastic optical network, shared segment protection, integer linear programming, survivability in elastic optical networks.

تاریخ ارسال مقاله: ۱۳۹۵/۰۸/۲۲

تاریخ اصلاح مقاله: ۱۳۹۵/۱۱/۰۶، ۱۳۹۵/۱۲/۱۷، ۱۳۹۶/۰۸/۲۹ و ۱۳۹۶/۰۹/۰۶

تاریخ پذیرش مقاله: ۱۳۹۶/۱۱/۰۳

نام نویسنده مسئول: عبدالرسول قاسمی

نشانی نویسنده مسئول: ایران - تهران - دانشگاه خواجه نصیرالدین طوسی - دانشکده مهندسی کامپیوتر.

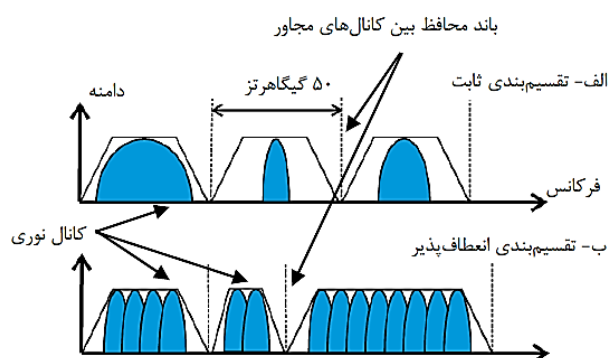
۱- مقدمه

به دلیل افزایش سرویس‌های چندرسانه‌ای و برنامه‌های رایانش ابری، حجم ترافیک اینترنت به میزان قابل توجهی افزایش یافته است. شبکه فیبر نوری به دلیل دارا بودن ظرفیت بالا در انتقال اطلاعات، یک معماری مناسب برای شبکه‌بندی نسل جدید است [۱، ۲]. استانداردهای مختلفی به منظور استفاده از طیف فیبر نوری معرفی شده است. فناوری تسهیم تقسیم طول موج^۱ (WDM) منطبق با استاندارد ITU-T^۲، از تقسیم فرکانسی ثابت ۵۰ گیگاهرتز برای طیف فیبر استفاده می‌کند [۳-۱]. شبکه نوری با فناوری WDM به دلیل استفاده از دانه‌بندی ثابت در تقسیم فرکانسی، انعطاف‌پذیری کمی در استفاده از منابع طیفی دارد و نمی‌تواند برای درخواست‌های ترافیکی با پهنای باند ناهمگن طیف متناسب با مقدار درخواستی اختصاص دهد [۴-۱]. شبکه نوری کشسان^۳ (EON) نسل جدیدی از شبکه‌های نوری است که هدف آن تقسیم‌بندی انعطاف‌پذیر طیف نوری، تخصیص بهینه منابع طیفی به درخواست‌ها و جلوگیری از هدر رفتن منابع طیفی است [۵-۲].

EON از فناوری تسهیم تقسیم فرکانسی متعامد^۴ (OFDM) برای تقسیم‌بندی طیف نوری استفاده می‌کند. OFDM یک روش مدولاسیون چندحاملی در شبکه‌های نوری است. در این روش، به جای استفاده از یک کانال با سرعت بالا، داده از چند زیرکانال با نرخ داده پایین انتقال می‌یابد. زمانی که جریان داده توسط مدولاسیون تک‌حاملی ارسال می‌شود، نرخ بیت بالا است و زمان بین نمونه‌برداری‌ها بسیار کوچک است. در این حالت، اگر تأخیر انتشار بیشتر از دوره نمونه‌برداری باشد، تداخل بین سمبل^۵ (ISI) اتفاق می‌افتد. در حالتی که جریان داده توسط مدولاسیون چندحاملی ارسال می‌شود، نرخ داده در هر یک از زیرحامل‌ها کمتر می‌شود و دوره نمونه‌برداری بیشتر از تأخیر انتشار می‌شود. به همین دلیل، در مدولاسیون چندحاملی، ISI و به دنبال آن، اثرات اختلالات فیزیکی کاهش می‌یابد. OFDM به دلیل مقاوم بودن در برابر ISI یک کاندید مناسب برای سیستم‌های ارتباطی سرعت بالا است [۶]. با استفاده از روش مدولاسیون OFDM در EON، طیف نوری به تعدادی شیار فرکانسی^۶ (FS) تقسیم می‌شود. در فناوری WDM برای جلوگیری از ایجاد تداخل، یک فاصله محافظ^۷ بین کانال‌های مجاور در نظر گرفته می‌شود، ولی در روش OFDM، به دلیل وجود ویژگی متعامد بودن، زیر-کانال‌های مجاور می‌توانند بدون ایجاد تداخل، محدوده طیفی هم‌پوشان داشته باشند؛ بر این اساس، ظرفیت کلی سیستم و کارایی طیفی بالا می‌رود [۷-۵]؛ هم‌چنین، به دلیل وجود ویژگی تعامد، هر زیرحامل کانال تخت‌تری را به لحاظ فرکانسی تجربه می‌کند. این فناوری در شبکه‌های بی‌سیم نیز مورد استفاده قرار گرفته است. WiMAX^۸ یک فناوری بی‌سیم پهن‌بند مبتنی بر OFDM^۹ مبتنی بر استاندارد IEEE 802.16 است. در این فناوری منابع موجود (زمان و فرکانس) به چندین زیرحامل عمودی در حوزه فرکانس و چندین سمبل همسایه در حوزه زمان تقسیم می‌شود. این تقسیم‌بندی سبب انعطاف‌پذیری بیشتر در تخصیص منابع و سرویس‌دهی به تعداد زیادی از کاربران با پشتیبانی از چندین سرویس

با کیفیت سرویس^{۱۰} (QoS) متفاوت می‌شود. تخصیص پهنای باند در فریم WiMAX شامل سمبل OFDMA در یک بعد و زیرکانال فرکانس در بعد دیگر است [۸].

در EON با فناوری OFDM، تعداد FS و فرمت مدولاسیون تخصیص داده شده برای هر درخواست ترافیکی براساس ۱- پهنای باند مورد نیاز، ۲- مسافت مسیر و ۳- ماهیت متغیر با زمان درخواست‌ها به صورت پویا تنظیم می‌شود [۵]؛ بنابراین، EON با گروه‌بندی تعدادی شیار فرکانسی یا با پشتیبانی از نرخ بیت مختلف برای هر FS، از نرخ داده مختلف پشتیبانی می‌کند [۳، ۵، ۶]. در شبکه نوری با فناوری WDM، امکان تغییر فرمت مدولاسیون وجود ندارد [۷]. در شکل ۱-الف تقسیم فرکانسی ثابت در شبکه نوری با فناوری WDM و در شکل ۱-ب تقسیم فرکانسی انعطاف‌پذیر در شبکه نوری کشسان نشان داده شده است. به دلیل ثابت بودن اندازه هر کانال در شبکه نوری با فناوری WDM، درخواست‌های با پهنای باند بالا با محدوده تقسیم کانال‌های مجاور برخورد می‌کنند و نمی‌توانند از گره‌های راهیاب^{۱۱} موجود در شبکه انتقال یابند [۳]. در شکل ۱-ب، زیرکانال‌ها و پهنای طیفی هر درخواست نشان داده شده است. در EON هر ارتباط به اندازه پهنای باند درخواستی طیف دریافت می‌کند و سیگنال اصلی از ترکیب چند شیار فرکانسی با فرکانس مرکزی متفاوت و دامنه یکسان تشکیل می‌شود [۹].



شکل ۱: الف- تقسیم فرکانسی ثابت در شبکه نوری با فناوری WDM و ب- تقسیم فرکانسی انعطاف‌پذیر در شبکه نوری کشسان

دو قید مهم در EON، مجاورت^{۱۲} و پیوستگی^{۱۳} طیفی است. براساس قید اول، مجموعه FS مجاور و پشت سرهم به یک درخواست اختصاص داده می‌شود تا براساس مدولاسیون OFDM و هم‌پوشانی زیرکانال‌های مجاور، از منابع طیفی بهینه استفاده شود. براساس قید دوم، مجموعه شیار فرکانسی که برای لینک‌های یک مسیر نوری اختصاص داده می‌شود، باید یکسان باشد. در غیر این صورت، گره‌ها باید قابلیت تغییر بازه فرکانسی داشته باشند که هزینه بالایی از نظر اقتصادی به شبکه تحمیل می‌شود [۵، ۱۰].

مسأله مسیریابی به عنوان یک موضوع مهم در انواع شبکه‌های سیمی و بی‌سیم، با معماری و همبندی‌های مختلف شناخته شده است. در تعیین مسیر برای یک درخواست ترافیکی معیارهای مختلفی از قبیل طول مسیر، قابلیت اطمینان، تأخیر، هزینه ارتباطات یا غیره می‌تواند در

ظرفیت یدکی کمتری نسبت به *DBPP* استفاده می‌کند. در این مقاله، کوتاه‌ترین مسیر بین هر جفت گره به‌عنوان مسیر کاری در نظر گرفته شده است؛ علاوه بر این، برای هر جفت گره چند مسیر کاندید نیز تعیین شده است که از نظر لینک با مسیر کاری مجزا هستند. مسیر پشتیبان به‌قسمی از این مجموعه کاندید انتخاب می‌شود که مجموع ظرفیت یدکی مسیرهای پشتیبان فعال شده در زمان اشکال یک لینک تصادفی، حداقل باشد. با توجه به وجود یا عدم وجود لینک مشترک بین جفت مسیرها، اندیس شروع مجموعه *FS* مناسب برای آن‌ها اختصاص داده می‌شود. در روش محافظت، مسیر پشتیبان در زمان خدمت‌دادن تعیین و طیف نوری به آن اختصاص داده می‌شود [۱۰]؛ بنابراین، برای درخواست‌های ورودی، مسیر پشتیبان باید به‌گونه‌ای انتخاب شود که ظرفیت یدکی کل استفاده‌شده کمینه شود. ولی در این مقاله تنها ظرفیت یدکی مسیرهای پشتیبان فعال شده در زمان اشکال یک لینک تصادفی کمینه می‌شود. براساس این موضوع، در روش *ILP* پیشنهادشده هدف تعیین مسیر پشتیبان همه درخواست‌ها براساس کمینه‌سازی ظرفیت یدکی کل استفاده شده است. مشابه [۱۰]، مسیرها به‌صورت جفت با یکدیگر مقایسه می‌شوند تا مجموعه *FS* مناسب برای هر مسیر کاری و پشتیبان اختصاص داده شود و مسیرهایی که احتمال فعال شدن یکسان دارند، مجموعه *FS* هم‌پوشان نداشته باشند. در روش پیشنهاد-شده مسیر پشتیبان به‌جای انتخاب از یک مجموعه مسیر کاندید، توسط *ILP* مشخص می‌شود. به‌همین دلیل، پیچیدگی زمانی روش پیشنهادی بیشتر است.

تعیین مکان و اطلاع‌رسانی اشکال به گره‌های مبدأ و مقصد در مسیرهای طولانی از شبکه‌های بزرگ، زمان زیادی طول می‌کشد؛ هم-چنین، در مسیرهای طولانی تعداد درخواست‌هایی که متأثر از اشکال می‌شوند، بیشتر است [۱۳]؛ به‌همین دلیل، روش محافظت مبتنی بر قطعه‌بندی در شبکه‌های نوری معرفی شده است. در محافظت قطعه مشترک^{۲۱} (*SSP*)، مسیر کاری به چندین حوزه محافظت تقسیم می‌شود. هر قطعه به‌عنوان یک واحد مستقل و خوددرمان عمل می‌کند. در این روش، بازیابی به‌صورت محلی انجام می‌شود. اگر یک لینک از مسیر کاری دچار اشکال شود، تنها قطعه پشتیبان مربوط به این لینک فعال می‌شود و در دیگر قطعه‌ها داده از مسیر کاری عبور می‌کند [۱۴، ۱۳]. با توجه به اینکه تعداد گام در هر قطعه کاری کمتر از تعداد گام در مسیر کاری است، احتمال وجود لینک مشترک بین قطعه‌های کاری کمتر می‌شود و قطعه‌های پشتیبان متناظر می‌توانند در لینک مشترک ظرفیت یدکی مشترک داشته باشند؛ بنابراین، میزان ظرفیت یدکی استفاده‌شده در *SSP* کمتر از *SBPP* می‌شود [۱۲]. پس از اینکه اشکال یک لینک توسط گره انتهایی لینک مورد نظر تشخیص داده شد، پیام اشکال به گره‌های انتهایی مسیر انتقال داده می‌شود تا ادامه جریان داده از مسیر پشتیبان عبور کند [۱۴]. اگر مسیر کاری طولانی باشد، زمان بازیابی اشکال و برقراری دوباره اتصال بیشتر می‌شود؛ بنابراین، زمان بازیابی اشکال در قطعه‌های کاری کمتر از زمان بازیابی در مسیرهای کاری است. با وجود

نظر گرفته شود. با توجه به معیاری که برای کاربران و اپراتورهای شبکه اولویت دارد، مسیریابی می‌تواند به روش‌های مختلفی انجام شود. در شبکه‌های حسگر بی‌سیم، با توجه به محدودیت انرژی موجود در گره‌های شبکه، میزان انرژی مصرفی الگوریتم‌های ارائه‌شده برای مسیریابی در این شبکه‌ها یک موضوع اصلی است. در [۱۱] یک پروتکل مسیریابی در شبکه‌های حسگر بی‌سیم مبتنی بر *QoS* با هدف افزایش طول عمر شبکه با استفاده از روش سلسله مراتبی پیشنهادشده است. در این مرجع، هم-چنین روش‌های پیشین پیشنهادشده نیز مورد بررسی قرار گرفته است. برای تعیین مسیر در شبکه‌های نوری کشتان ابتدا باید شیارهای فرکانسی استفاده‌نشده به‌ازای هر یک از لینک‌های شبکه مشخص شود. مسأله پیدا کردن منابع طیفی استفاده‌نشده لینک‌ها با هدف تعیین یک مسیر نوری بین جفت گره مبدأ و مقصد، با عنوان مسیریابی و تخصیص طیف^{۱۴} (*RSA*) نام‌گذاری می‌شود. در [۵] روش‌های مختلفی که برای مسیریابی و تخصیص طیف در شبکه‌های نوری معرفی شده است، مورد بررسی قرار گرفته است.

به‌دلیل ظرفیت بالای هر فیبر در انتقال اطلاعات، بازیابی اشکال^{۱۵} یک چالش مهم در شبکه‌های نوری است. شبکه‌ای قابل بقا است که در زمان رخ دادن اشکال قابلیت برقرار کردن دوباره اتصال را داشته باشد [۱۲]. از روش‌های بازیابی می‌توان به محافظت^{۱۶} و ترمیم^{۱۷} اشاره کرد. در روش ترمیم، مسیر پشتیبان بعد از ایجاد اشکال در شبکه تعیین می‌شود. در این روش، وجود مسیر پشتیبان به منابع طیفی موجود در زمان اشکال وابسته است. در روش محافظت، مسیر پشتیبان قبل از وقوع اشکال و در زمان خدمت‌دادن به یک درخواست تعیین و طیف نوری برای آن ذخیره می‌شود. در این روش، احتمال بازیابی بعد از ایجاد اشکال ۱۰۰٪ است، ولی تمام ظرفیتی که برای مسیرهای پشتیبان استفاده می‌شود، افزونه است. شیارهای فرکانسی که برای مسیرهای پشتیبان استفاده می‌شود، به‌عنوان ظرفیت یدکی معرفی می‌شود و هدف اصلی کمینه کردن این ظرفیت است [۱۲، ۱۰، ۱].

از روش‌های محافظت مسیر می‌توان به محافظت مسیر اختصاصی^{۱۸} (*DBPP*) و مشترک^{۱۹} (*SBPP*) اشاره کرد. در روش *DBPP*، منابع طیفی به‌صورت انحصاری برای هر مسیر پشتیبان تخصیص داده می‌شود. در روش *SBPP*، ظرفیت یدکی می‌تواند بین چند مسیر پشتیبان به اشتراک گذاشته شود [۱۲، ۱۰، ۱]. با توجه به اینکه احتمال اشکال لینک در شبکه‌های نوری بیشتر از احتمال اشکال گره است [۱۰]، مسیرهای کاری که لینک مشترک دارند، احتمال اشکال هم‌زمان دارند؛ در این حالت، مسیرهای پشتیبان آن‌ها هم‌زمان فعال می‌شود. مسیرهای پشتیبان تنها در زمان وقوع اشکال فعال هستند؛ بنابراین، مسیرهای پشتیبانی که احتمال فعال شدن هم‌زمان آن‌ها وجود ندارد، می‌توانند در لینک مشترک مجموعه شیار فرکانسی هم‌پوشان داشته باشند.

در [۱۰] دو روش *SBPP* و *DBPP* برای شبکه‌های نوری کشتان با استفاده از برنامه‌ریزی خطی صحیح^{۲۰} (*ILP*) در مرحله طراحی شبکه مورد بررسی و مقایسه قرار گرفته است و نشان داده شده است که *SBPP*

برای هر قطعه پشتیبان تعیین نمی‌شود. هم‌چنین، در این مراجع قید دوم مربوط به محافظت مبتنی بر قطعه‌بندی در نظر گرفته نشده است؛ در مقابل، در روش پیشنهاد شده حافظه یدکی به‌صورت دقیق تخصیص داده می‌شود و برای هر مسیر پشتیبان اندیس شروع و پایان مجموعه شیار فرکانسی تعیین می‌شود. هم‌چنین، به دلیل تعیین گره‌های مناسب برای مجهز کردن به قابلیت تغییر بازه‌ی فرکانسی، درخواست‌ها در مرحله طراحی شبکه مورد بررسی قرار می‌گیرند تا براساس شبیه‌سازی‌های مختلف با مجموعه درخواست‌های ورودی متفاوت، مجموعه گره‌های مناسب برای مجهز کردن به قابلیت تغییر بازه‌ی فرکانسی انتخاب شود.

در مرجع [۱۶] مسأله SSP با ILP مدل‌سازی شده است. برای هر درخواست ورودی مسیر کاری از قبل مشخص است. قطعه‌های پشتیبان توسط روش برچسب‌گذاری لینک‌های مسیر پشتیبان تعیین می‌شود. تعداد حداکثر قطعه‌ای که می‌تواند در طول مسیر کاری ایجاد شود، به اندازه تعداد لینک مسیر کاری است. فرض اصلی در این مرجع، از قبل مشخص بودن تعداد قطعه‌ای است که بر روی مسیر کاری ایجاد می‌شود. به‌ازای هر یک از حالت‌های ممکن برای تعداد قطعه، ILP اجرا می‌شود و در آخر قطعه‌بندی مناسب با حداقل ظرفیت یدکی انتخاب می‌شود. با توجه به اینکه تعداد قطعه از قبل مشخص است، قیودی توسط ILP بیان می‌شود که نحوه و ترتیب قرارگیری گره‌های راهیاب و ترکیب را مشخص می‌کند. به‌دلیل اینکه در روش پیشنهاد شده درخواست‌ها به‌صورت هم‌زمان پردازش می‌شوند، حالت‌های مختلف برای تعداد قطعه به‌ازای هر درخواست، باید توسط مدل ILP بررسی شود؛ بنابراین، مدل ارائه شده در [۱۶] برای پردازش درخواست‌ها در مرحله طراحی شبکه مناسب نیست.

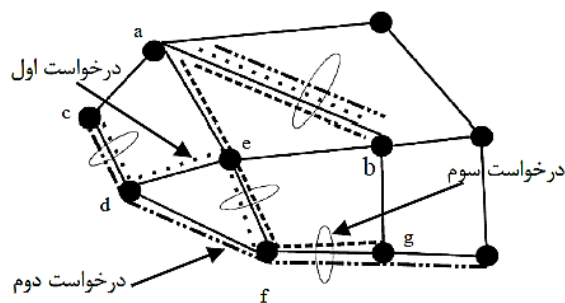
در مرجع [۱۷] روش قطعه‌بندی در شبکه‌های نوری با فناوری WDM معرفی شده است. در این مقاله، k جفت مسیر مجزا برای هر درخواست ترافیکی تعیین می‌شود. با توجه به اینکه هر جفت مسیر می‌تواند از نظر لینک یا از نظر گره مجزا باشد، دو الگوریتم متفاوت برای قطعه‌بندی جفت مسیرها و تعیین جفت مسیر قطعه‌بندی شده ارائه شده است. علاوه بر k جفت مسیر کاندید برای هر درخواست ترافیکی، k جفت مسیر کاندید قطعه‌بندی شده نیز تعیین می‌شود. برای مجموعه درخواست ترافیکی ورودی، بهترین کاندیدها با هدف کمینه کردن مجموع ظرفیت کاری و یدکی کل انتخاب می‌شود. در شبکه نوری با فناوری WDM، برای درخواست‌هایی که نیازمند بیش از یک طول موج هستند، هر طول موج می‌تواند از مسیرهای متفاوتی عبور کند. در شبکه نوری با فناوری OFDM باید مجموعه شیارهای فرکانسی مجاور به یک درخواست تخصیص داده شود. در [۱۷]، مسیر پشتیبان و مجموعه قطعه پشتیبان از مجموعه کاندید از قبل تعیین شده انتخاب می‌شود. به‌منظور تعیین حالت بهینه، در روش پیشنهاد شده تمام حالت‌های ممکن برای قطعه‌بندی یک مسیر کاری توسط مدل ILP مورد بررسی قرار می‌گیرد. مدل‌سازی پیشنهاد شده با وجود انتخاب قطعه‌های بهینه، پیچیدگی زمانی بالا دارد. در ادامه نحوه محاسبه ظرفیت یدکی کل در [۱۷، ۱۶] شرح داده می‌شود.

ویژگی‌هایی که قطعه‌بندی مسیر دارد، ولی هزینه گره‌هایی که قابلیت تغییر بازه‌ی فرکانسی دارند، نسبت به هزینه گره‌هایی که این قابلیت را ندارند، بیشتر است.

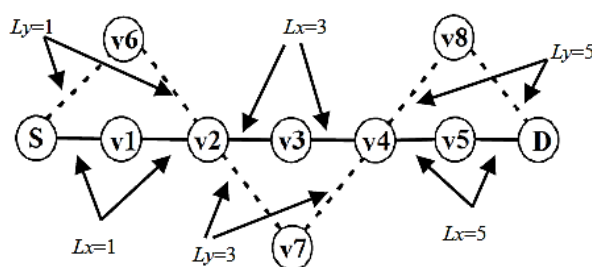
در SSP دو قطعه کاری مجاور می‌توانند هم‌پوشان و یا غیرهم‌پوشان باشند. به‌عبارت دیگر، در قید اول از SSP یک لینک از مسیر کاری می‌تواند حداقل به یک قطعه کاری و حداکثر به دو قطعه کاری تعلق داشته باشد؛ ولی در زمان اشکال، توسط قطعه پشتیبان دوم بازیابی می‌شود [۱۲]. قید دوم در SSP این است که یک قطعه کاری نباید به‌صورت کامل زیرمجموعه قطعه کاری دیگر از همان مسیر باشد [۱۲]. در شکل ۲ و ۳ به‌ترتیب قطعه‌بندی غیر هم‌پوشان و هم‌پوشان و نحوه برچسب‌گذاری هر کدام بر طبق [۱۵، ۱۴] نشان داده شده است. در قطعه‌بندی غیر هم‌پوشان، گره مقصد هر قطعه به‌عنوان گره مبدأ قطعه بعدی است. در قطعه‌بندی هم‌پوشان گره مبدأ قطعه بعدی می‌تواند قبل از گره مقصد قطعه قبلی باشد. در محافظت قطعه مشترک غیرهم‌پوشان، گره‌های مشترک بین دو قطعه (گره ۷۴ و ۷۲ در شکل ۲)، قابل بازیابی نیستند، ولی در محافظت قطعه مشترک هم‌پوشان، علاوه بر اشکال لینک، اشکال گره‌های راهیاب و ترکیب^{۲۲} نیز قابل بازیابی است. در [۱۵، ۱۴] روش SSP با استفاده از مکانیزم برچسب‌گذاری لینک-های مسیر کاری و مسیر پشتیبان توسط ILP مدل‌سازی شده است. گره مبدأ و مقصد هر قطعه به‌ترتیب، با عنوان گره راهیاب و گره ترکیب معرفی می‌شود. در این مراجع، درخواست‌ها به‌صورت پویا خدمت داده می‌شوند. با توجه به ظرفیت موجود در هر لینک و پهنای باند مورد نیاز درخواست جدید، سه گراف از شبکه ایجاد می‌شود. گراف G_w شامل تمام گره‌های شبکه و مجموعه لینک‌هایی است که ظرفیت آزاد آنها کمتر از پهنای باند مورد نیاز نباشد. گراف G_p شامل تمام گره‌های شبکه و مجموعه لینک‌هایی است که مجموع ظرفیت آزاد و ظرفیت یدکی استفاده شده آن کمتر از پهنای باند مورد نیاز نباشد. گراف G'_p برای تعیین مسیر پشتیبان تجمعی^{۲۳} است و شامل لینک‌های G_w در جهت عکس و لینک‌های گراف G_p در جهت مستقیم است. با استفاده از گراف‌های معرفی شده، برای هر درخواست ترافیکی ورودی، مسیر کاری و مسیر پشتیبان تجمعی به قسمی تعیین می‌شود که ظرفیت یدکی غیر مشترک و ظرفیت کاری ذخیره شده در شبکه حداقل باشد.

مسیر پشتیبان تجمعی [۱۴] شامل مسیر تمام قطعه‌های پشتیبان یک درخواست و برخی از لینک‌های مسیر کاری در جهت عکس است. در شکل ۲ و ۳ مسیر خط‌چین مسیر پشتیبان تجمعی را نشان می‌دهد. گره‌هایی از مسیر کاری که مسیر پشتیبان تجمعی وارد مسیر کاری می‌شود (گره ۷۳ در شکل ۳)، به‌عنوان گره ترکیب و گره‌هایی که مسیر پشتیبان تجمعی از مسیر کاری خارج می‌شود (گره ۷۲ در شکل ۳)، به‌عنوان گره راهیاب هستند.

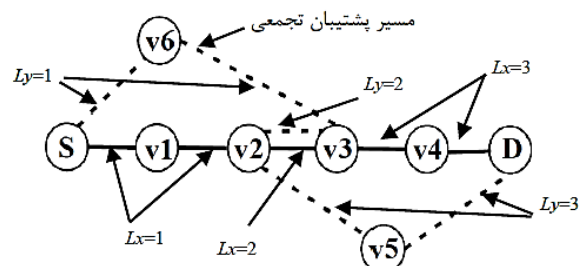
در [۱۵، ۱۴] برای هر درخواست ورودی، مسیر پشتیبان تجمعی به‌گونه‌ای تعیین می‌شود که مجموع ظرفیت یدکی غیرمشترک تمام لینک‌های مسیر پشتیبان تجمعی کمینه شود ولی محدوده طیفی دقیق



شکل ۴: محافظت مسیر مشترک



شکل ۲: برچسب‌گذاری در محافظت مبتنی بر قطعه توسط قطعه‌های غیرهم‌پوشان



شکل ۳: برچسب‌گذاری در محافظت مبتنی بر قطعه توسط قطعه‌های هم‌پوشان

یکی از اهدافی که در روش‌های مختلف محافظت در نظر گرفته می‌شود، کمینه‌کردن ظرفیت یدکی افزونه ذخیره‌شده در شبکه است. میزان ظرفیت یدکی ذخیره‌شده و زمان بازیابی اشکال در محافظت قطعه مشترک نسبت به محافظت مسیر مشترک کمتر است. هدف این مقاله معرفی روش SSP برای EON است. هزینه‌ای که در این روش محافظت به شبکه تحمیل می‌شود، هزینه گره‌هایی است که قابلیت تغییر بازه‌ی فرکانسی دارند. مسأله با استفاده از ILP مدل‌سازی می‌شود. در روش پیشنهادشده فرض شده است، برای هر جفت گره از شبکه تنها یک مسیر با کوتاه‌ترین طول وجود دارد و این مسیر به‌عنوان مسیر کاری در نظر گرفته می‌شود. قطعه‌بندی مسیر کاری و تعیین قطعه پشتیبان برای هر قطعه کاری با استفاده از روش برچسب‌گذاری معرفی شده در [۱۵، ۱۴] انجام می‌شود. با توجه به برچسب‌های اختصاص داده شده به لینک‌های مسیر کاری و مسیر پشتیبان تجمعی، مسیرهای هر قطعه تعیین می‌شود. با استفاده از روشی که در [۱۰] برای تخصیص مجموعه شیار فرکانسی در EON معرفی شده است، برای قطعه‌های کاری و پشتیبان مجموعه شیار فرکانسی اختصاص داده می‌شود. به‌همین منظور، در بخش ۲ مدل سیستمی مسأله مدل‌سازی شده بیان می‌شود. در بخش ۳ طرح ILP پیشنهادشده معرفی می‌شود. در بخش ۴ نتایج شبیه‌سازی ارائه و مورد بررسی و ارزیابی قرار می‌گیرد.

۲- مدل سیستمی و بیان مسأله

شبکه مورد بررسی با گراف $G(N, L)$ نمایش داده می‌شود. N مجموعه گره‌های شبکه و L مجموعه لینک‌های شبکه است. هر لینک شامل دو یال جهت‌دار است و l نشان‌دهنده این مجموعه است. گره‌های شبکه با یک شماره منحصر به فرد مشخص شده است. شماره گره‌ها از ۱ شروع می‌شود و تا شماره N ادامه می‌یابد. هر یال جهت‌دار با جفت گره ابتدا و انتها خود مشخص می‌شود. R مجموعه درخواست‌هایی است که هم‌زمان به‌صورت دسته‌ای خدمت داده می‌شوند. هیچ محدودیتی برای تعداد شیار فرکانسی موجود در هر لینک وجود ندارد و هدف مسأله، کمینه‌کردن یک تابع وزن‌دار از ظرفیت یدکی کل و حداکثر اندیس شیار فرکانسی ذخیره‌شده در شبکه است. هر لینک شبکه یک شماره منحصر به فرد دارد. ماتریس $Link_num(a, b)$ شماره لینک بین دو گره a و b را نشان می‌دهد. هر لینک از دو یال جهت‌دار تشکیل شده است. برای

در [۱۷، ۱۶] روش یکسانی برای محاسبه ظرفیت یدکی کل استفاده شده است. به‌ازای هر جفت لینک مجزا، درخواست‌هایی که مسیر کاری آن‌ها از لینک اول و مسیر پشتیبان آن‌ها از لینک دوم عبور می‌کند، مشخص می‌شود. مسیرهای پشتیبان مشترک در لینک دوم نمی‌توانند ظرفیت یدکی مشترک داشته باشند؛ بنابراین، تعداد طول موج پشتیبان ذخیره شده در لینک دوم برابر مجموع تعداد طول موج مورد نیاز مسیرهای پشتیبان عبوری است. به‌ازای تمام لینک‌هایی که می‌توانند به‌عنوان لینک اول انتخاب شوند، حداکثر ظرفیت یدکی استفاده‌شده بر روی یک لینک خاص مشخص می‌شود. روش ارائه‌شده برای تعیین ظرفیت یدکی، با توجه به مثالی که در شکل ۴ نشان داده شده است، درست نیست. در شکل ۴، ۳ مسیر کاری دو به دو لینک مشترک دارند و مسیر پشتیبان آن‌ها از لینک (a, b) عبور می‌کند. با توجه به اینکه ۳ مسیر کاری دو به دو احتمال اشکال هم‌زمان دارند، ۳ مسیر پشتیبان نمی‌توانند در لینک (a, b) ظرفیت مشترک داشته باشند؛ بنابراین، میزان ظرفیت یدکی ذخیره‌شده در لینک (a, b) برابر ۳ طول موج است. ولی با توجه به آنچه که در [۱۷، ۱۶] بیان شده است، در بررسی لینک (a, b) با هر کدام از لینک‌های (c, d) ، (e, f) و (f, g) ، میزان ظرفیت یدکی مورد نیاز در لینک (a, b) برابر ۲ طول موج شمارش می‌شود. به‌همین دلیل، در [۱۵، ۱۴] برخلاف [۱۷، ۱۶]، تمام لینک‌های مسیر کاری درخواست ورودی به‌عنوان یک مجموعه انتخاب می‌شود. مسیرهای پشتیبان متناظر با مسیرهای کاری که حداقل یک لینک مشترک با مجموعه مورد نظر دارند، نمی‌توانند در لینک مشترک ظرفیت یدکی مشترک داشته باشند.

کل در تابع هدف پیشنهاد شده، حداکثر ظرفیت مورد نیاز لینک است و شیارهای فرکانسی میانی لینک که ممکن است بلااستفاده باشند، جز ظرفیت یدکی کل در نظر گرفته شده است. متغیر دوم برای تابع هدف، ظرفیت لینک با بیشترین شیار فرکانسی ذخیره شده است. دلیل کمینه کردن این متغیر، توزیع یکنواخت ترافیک در کل شبکه است. پارامتر وزنی α مشابه [۱۰] مقدار 0.1 دارد. این مقدار بالا بودن اولویت کمینه کردن ظرفیت یدکی کل نسبت به توزیع یکسان ترافیک در لینک‌های شبکه را نشان می‌دهد. هدف این مقاله ارائه یک روش محافظت با کمترین میزان مصرف حافظه یدکی کل است.

$$\text{Minimize } \sum_{j \in L} P(j) * \text{distance}[j] + \alpha * c \quad (1)$$

در قید (۲) مسیر پشتیبان تجمعی از گره مبدأ تا گره مقصد با استفاده از یال‌های جهت‌دار تعیین می‌شود. در گره مبدأ تعداد یال جهت‌دار خروجی یک واحد بیشتر از تعداد یال جهت‌دار ورودی به گره مبدأ است. برای گره مقصد حالت عکس برقرار است. برای گره‌های میانی مسیر پشتیبان، تعداد یال خروجی برابر با تعداد یال ورودی است.

$$\sum_{(a,b) \in L} Y_{ab}(r, a, b) - \sum_{(b,a) \in L} Y_{ab}(r, b, a) = \begin{cases} 1 & a = s \\ 0 & a \neq s, d \\ -1 & a = d \end{cases} \quad (2)$$

در قطعه‌بندی هم‌پوشان، مسیر پشتیبان تجمعی (همانند شکل ۳)، می‌تواند لینک‌های مسیر کاری را در جهت عکس پیمایش کند. در قید (۳) بیان می‌شود که دو یال غیر هم‌جهت از یک لینک می‌توانند در یک جفت مسیر کاری و مسیر پشتیبان مشترک باشند. بر اساس این قید، Y_{ab} در لینک‌هایی که جز مسیر کاری است، می‌تواند حداکثر مقدار ۱ دریافت کند. در واقع، با این قید تضمین می‌شود که یک لینک از مسیر کاری حداقل به یک و حداکثر به دو قطعه کاری تعلق دارد.

$$X_{ab}(r, a, b) \geq Y_{ab}(r, b, a) * (X_{ab}(r, a, b)) \quad \forall r \in R, a, b \in N, (a, b) \text{ and } (b, a) \in l \quad (3)$$

قید (۴) مجزای بودن یال‌های جهت‌دار را در مسیر کاری و مسیر پشتیبان تضمین می‌کند. با توجه به اینکه قطعه‌های ایجاد شده بر روی یک مسیر کاری مستقل از هم هستند، یک لینک می‌تواند در چند قطعه پشتیبان از یک مسیر مشترک باشد؛ به همین دلیل، حداکثر مقدار $Y_{ab}(r, a, b)$ برابر حداکثر تعداد قطعه ممکن در طول یک مسیر (K_{max}) است.

$$K_{max} * X_{ab}(r, a, b) + Y_{ab}(r, a, b) \leq K_{max} \quad \forall r \in R, a, b \in N, (a, b) \text{ and } (b, a) \in l \quad (4)$$

در محافظت قطعه مشترک، یک قطعه نباید به صورت کامل زیرمجموعه قطعه دیگر از یک درخواست باشد؛ بنابراین، طبق قید (۵) در گره‌هایی که یال مسیر پشتیبان تجمعی وارد مسیر کاری می‌شود، نباید یال جهت‌دار کاری خروجی از این گره توسط مسیر پشتیبان تجمعی پیمایش شود. در واقع، در این قید تضمین می‌شود گره ترکیب یک قطعه، قبل از گره ترکیب قطعه قبلی نباشد. این قید در مرجع [۱۴] و [۱۵] در نظر گرفته نشده است.

دو یال جهت‌دار $(\overrightarrow{a, b})$ و $(\overrightarrow{b, a})$ از لینک، شماره لینک یکسان اختصاص داده شده است. یال‌های جهت‌دار برای ایجاد مسیر پشتیبان تجمعی از گره مبدأ تا گره مقصد تعریف شده است. پارامتر دودویی $XP(r, j)$ و $X_{ab}(r, a, b)$ نشان‌دهنده کوتاه‌ترین مسیر بین هر جفت گره شبکه است. کوتاه‌ترین مسیر بین هر جفت گره به عنوان مسیر کاری انتخاب می‌شود. مقدار ۱ در درایه (r, j) از ماتریس XP وجود لینک شماره j در مسیر کاری درخواست ترافیکی شماره r را نشان می‌دهد، و مقدار ۱ در درایه (r, a, b) از ماتریس X_{ab} عبور مسیر کاری درخواست ترافیکی شماره r از یال جهت‌دار $(\overrightarrow{a, b})$ را نشان می‌دهد. s و d گره‌های مبدأ و مقصد هر درخواست را نشان می‌دهد. K_{max} بیشترین تعداد قطعه ایجاد شده بر روی یک مسیر را نشان می‌دهد. با توجه به اندازه همبندی‌های بررسی شده در این مقاله، مقدار پارامتر K_{max} عدد ۵ در نظر گرفته شده است. تعداد شیار فرکانسی مورد نیاز برای هر درخواست ترافیکی بدون در نظر گرفتن فاصله فیزیکی، فرمت مدولاسیون و سایر ویژگی‌های فیزیکی مسیر، ۱۰ فرض شده است و در بردار $D(r)$ ذخیره شده است.

بردار sw قابلیت تغییر بازه‌ی فرکانسی گره‌های شبکه را نشان می‌دهد. مقدار ۱ در درایه (i) از این بردار وجود قابلیت تغییر بازه‌ی فرکانسی در گره شماره i را نشان می‌دهد. در تعیین مسیر پشتیبان تجمعی، به ازای هر گره یال‌های جهت‌دار ورودی و خروجی بررسی می‌شود. در حالتی که هیچ کدام از گره‌های شبکه قابلیت تغییر بازه‌ی فرکانسی ندارند، دو مسیر کاری و مسیر پشتیبان نمی‌توانند هیچ لینک و گره مشترک داشته باشند و محافظت انجام شده، معادل $SBPP$ است. در حالتی که گره‌های شبکه قابلیت تغییر بازه‌ی فرکانسی دارند، مسیر کاری می‌تواند از گره‌های میانی قطعه‌بندی شده و SSP انجام شود. متغیرهایی که در مدل‌سازی مسأله استفاده شده‌اند، در جدول ۱ نشان داده شده است.

۳- طرح پیشنهادی برای محافظت مبتنی بر قطعه‌بندی با

استفاده از ILP

در رابطه (۱) تابع هدف مسأله بیان شده است. در مدل‌سازی پیشنهاد شده هدف کمینه کردن یک تابع وزن‌دار از ظرفیت یدکی کل و حداکثر اندیس شیار فرکانسی استفاده شده در شبکه است. در این مقاله راه‌حل جدیدی برای شمارش شیارهای فرکانسی یدکی پیشنهاد شده است. در ابتدا، به قطعه‌های پشتیبان شیار فرکانسی اختصاص داده می‌شود و اندیس شروع شیار فرکانسی هر قطعه پشتیبان تعیین می‌شود. سپس، به ازای هر قطعه پشتیبان، اندیس پایانی شیار فرکانسی لینک‌های هر قطعه پشتیبان تعیین می‌شود. با مشخص کردن قطعه‌های پشتیبان عبوری از هر لینک، حداکثر اندیس شیار فرکانسی ذخیره شده در هر لینک تعیین می‌شود. حداکثر اندیس شیار فرکانسی ذخیره شده در هر لینک به فاصله فیزیکی آن بر حسب کیلومتر ضرب می‌شود تا در قطعه‌های پشتیبان نیز کوتاه‌ترین مسیر انتخاب شود. منظور از ظرفیت یدکی

جدول ۱: متغیرهای استفاده شده در مدل ILP

متغیرها	توضیحات	متغیرها	توضیحات
$Y_{ab}(r, a, b)$	یک ماتریس با مقادیر صحیح است. مقادیر بزرگتر از یک در درایه (r, a, b) نشان‌دهنده تعداد عبور مسیر پشتیبان تجمعی شماره r از یال جهت‌دار $(\overrightarrow{a, b})$ است.	$EPS_link(r, t, k_1, k_2, j)$	یک ماتریس دودویی است و مقدار ۱ در درایه (r, t, k_1, k_2, j) نشان‌دهنده مشترک‌بودن لینک j در قطعه کاری شماره k_1 از درخواست r و قطعه کاری شماره k_2 از درخواست t است.
$LY_{ab}(r, a, b)$	یک ماتریس با مقادیر صحیح است و درایه (r, a, b) نشان‌دهنده مقدار برچسب یال جهت‌دار $(\overrightarrow{a, b})$ برای مسیر پشتیبان تجمعی شماره r است.	$EPS(r, t, k_1, k_2)$	یک ماتریس دودویی است. مقدار ۱ در درایه (r, t, k_1, k_2) نشان‌دهنده وجود حداقل یک لینک مشترک بین قطعه کاری شماره k_1 از درخواست شماره r و قطعه کاری شماره k_2 از درخواست شماره t است.
$LLY_{ab}(r, a, b)$	همانند ماتریس LY_{ab} مقدار برچسب یال-های جهت‌دار مسیر پشتیبان را بدون در نظر گرفتن یال‌های مشترک با مسیر کاری نشان می‌دهد.	$Sigma_link(r, t, k_1, k_2, j)$	یک ماتریس دودویی است و مقدار ۱ در درایه (r, t, k_1, k_2, j) لینک j در قطعه پشتیبان شماره k_1 از درخواست شماره r و قطعه پشتیبان شماره k_2 از درخواست شماره t است.
$YY_{ab}(r, a, b)$	همانند ماتریس Y_{ab} یال‌های جهت‌دار مسیر پشتیبان را بدون در نظر گرفتن یال-های مشترک با مسیر کاری نشان می‌دهد.	$Sigma1(r, t, k_1, k_2)$	یک ماتریس دودویی است. مقدار ۱ در درایه (r, t, k_1, k_2) نشان‌دهنده وجود حداقل یک لینک مشترک بین قطعه پشتیبان شماره k_1 از درخواست شماره r و قطعه پشتیبان شماره k_2 از درخواست شماره t است.
$YK_{ab}(r, k, a, b)$	یک ماتریس دودویی است و مقدار ۱ در درایه (r, k, a, b) نشان‌دهنده عبور قطعه پشتیبان شماره k از درخواست شماره r از یال جهت‌دار $(\overrightarrow{a, b})$ است.	$Sigma(r, t, k_1, k_2)$	یک ماتریس دودویی است. اگر قطعه پشتیبان شماره k_1 از درخواست شماره r و قطعه پشتیبان شماره k_2 از درخواست شماره t حداقل یک لینک مشترک داشته و قطعه‌های کاری آن‌ها نیز حداقل در یک لینک مشترک باشند، مقدار درایه (r, t, k_1, k_2) ۱ می‌شود.
$YPK(r, k, j)$	یک ماتریس دودویی است و مقدار ۱ در درایه (r, k, j) نشان‌دهنده عبور قطعه پشتیبان شماره k از درخواست شماره r از لینک j است.	$E(r, k)$	یک ماتریس دودویی با مقادیر صحیح است. مقدار موجود در درایه (r, k) اندیس شروع شیار فرکانسی برای قطعه پشتیبان شماره k از درخواست شماره r را نشان می‌دهد.
$Lx(r, j)$	یک ماتریس با مقادیر صحیح است و درایه (r, j) نشان‌دهنده مقدار برچسب لینک شماره j از مسیر کاری شماره r است.	$Z_{ij}(r, t, k_1, k_2)$	یک متغیر دودویی است. درایه (r, t, k_1, k_2) زمانی مقدار ۱ دریافت می‌کند که اندیس شروع شیار فرکانسی قطعه پشتیبان شماره k_1 از مسیر شماره r از اندیس شروع شیار فرکانسی قطعه پشتیبان شماره k_2 از مسیر شماره t بزرگ‌تر باشد $(e(r, k_1) > e(r, k_2))$.
$Lx_{ab}(r, a, b)$	یک ماتریس با مقادیر صحیح است و درایه (r, a, b) نشان‌دهنده مقدار برچسب یال جهت‌دار $(\overrightarrow{a, b})$ از مسیر کاری شماره r است.	$P_f(r, k, j)$	یک ماتریس با مقادیر صحیح است. مقدار درایه (r, k, j) اندیس آخر شیار فرکانسی ذخیره‌شده برای لینک j از قطعه پشتیبان شماره k مسیر شماره r را نشان می‌دهد.
$XPK(r, k, j)$	یک ماتریس دودویی است و مقدار ۱ در درایه (r, k, j) نشان‌دهنده عبور قطعه کاری شماره k از درخواست شماره r از لینک j است.	$P(j)$	مقدار درایه j حداکثر اندیس شیار فرکانسی یدکی ذخیره‌شده در لینک شماره j را نشان می‌دهد.
c	حداکثر اندیس شیار فرکانسی استفاده‌شده در کل شبکه را نشان می‌دهد.		

$$1 \leq \sum_{k=1..k_{max}} 2k * XPK(r, k, j) - Lx(r, j) \leq 2 \quad \forall r \in R, j \in L \quad (12)$$

در قید (۱۳) بیان می‌شود که هر لینک از مسیر کاری تنها به یک قطعه تعلق دارد و توسط یک قطعه پشتیبان بازیابی می‌شود.

$$\sum_{k=1..k_{max}} XPK(r, k, j) = XP(r, j) \quad r \in R, j \in L \quad (13)$$

قید (۱۴) و (۱۵) یال‌های مسیر پشتیبان را برچسب‌گذاری می‌کند. اختلاف برچسب دو یال جهت‌دار و پشت سرهم از مسیر پشتیبان، برابر مجموع تعداد یال جهت‌دار کاری (بدون در نظر گرفتن یال‌هایی که در جهت عکس مسیر پشتیبان هستند) عبور کرده از گره میانی است. در ابتدا بررسی می‌شود که دو یال جهت‌دار انتخاب‌شده عضو قطعه پشتیبان باشند و سپس مقدار اختلاف برچسب آن‌ها را برابر تعداد یال جهت‌دار کاری عبوری در نظر می‌گیرد. در قید (۱۵) حد بالا برای اختلاف دو برچسب بیان می‌کند. در صورتی که دو یال جهت‌دار پشت سرهم عضو مسیر پشتیبان نباشند، با توجه به دو قید زیر اختلاف برچسب برابر صفر می‌شود.

$$\begin{aligned} \sum_{(a,b) \in L} Ly_{ab}(r, a, b) - \sum_{(b,a) \in L} Ly_{ab}(r, b, a) \geq \\ -2k_{max} + \sum_{(a,b) \in L} k_{max} * Y_{ab}(r, a, b) + \\ \sum_{(b,a) \in L} k_{max} * Y_{ab}(r, b, a) + \\ \sum_{(a,b) \in L} (X_{ab}(r, a, b) - Y_{ab}(r, b, a)) + \\ X_{ab}(r, a, b) = 1 \\ \sum_{(b,a) \in L} (X_{ab}(r, b, a) - \\ X_{ab}(r, b, a) = 1 \\ Y_{ab}(r, a, b)) \quad \forall r \in R, a \in N, a \neq s, d \end{aligned} \quad (14)$$

$$\begin{aligned} \sum_{(a,b) \in L} Ly_{ab}(r, a, b) - \sum_{(b,a) \in L} Ly_{ab}(r, b, a) \leq \\ \sum_{(a,b) \in L} (X_{ab}(r, a, b) - Y_{ab}(r, b, a)) + \\ X_{ab}(r, a, b) = 1 \\ \sum_{(b,a) \in L} (X_{ab}(r, b, a) - Y_{ab}(r, a, b)) \quad \forall r \in R, \\ X_{ab}(r, b, a) = 1 \\ R, a \in N, a \neq s, d \end{aligned} \quad (15)$$

قید (۱۶) برای بررسی قابلیت تغییر بازه‌ی فرکانسی گره است. با توجه به این قید، اگر یک گره از مسیر کاری (یعنی حاصل عبارت $-2k_{max} +$ $\sum_{(a,b) \in L} k_{max} * X_{ab}(r, a, b) + \sum_{(b,a) \in L} k_{max} * X_{ab}(r, b, a)$) برابر صفر باشد، این قابلیت را نداشته باشد ($sw=0$)، نباید لینک‌های مسیر پشتیبان تجمعی از این گره عبور کند. اگر یک گره جز مسیر کاری نباشد، بدون بررسی قابلیت تغییر بازه‌ی فرکانسی، مسیر پشتیبان تجمعی می‌تواند از این گره عبور می‌کند. به سبب آنکه حداکثر مقدار $Y_{ab}(r, a, b)$ برابر k_{max} است، در k_{max} ضرب می‌شود. در گذر مسیر پشتیبان تجمعی از گره‌های مسیر کاری، تمام گره‌ها به جز گره مبدأ و مقصد بررسی می‌شود. دلیل این موضوع این است که در گذر یک مسیر از یک گره، یال ورودی و یال خروجی با هم بررسی می‌شود و لینک اول هر مسیر مقدار برچسب یک دارد.

$$\begin{aligned} (-2k_{max} + \sum_{(a,b) \in L} k_{max} * X_{ab}(r, a, b) + \\ \sum_{(b,a) \in L} k_{max} * X_{ab}(r, b, a) + \\ \sum_{(a,b) \in L} Y_{ab}(r, a, b) + \sum_{(b,a) \in L} Y_{ab}(r, b, a)) * \\ (1 - sw) \leq 0 \quad \forall r \in R, a \in N, a \neq s, d \end{aligned} \quad (16)$$

$$Y_{ab}(r, b, a) + \sum_{(c,a) \in L, c \neq b} Y_{ab}(r, c, a) \leq 1 \quad \forall r \in R, \forall a, b \in N, a \neq s, d, X_{ab}(r, a, b) = 1 \quad (5)$$

قید (۶) مقدار برچسب ۱ را برای لینک کاری خروجی از مبدأ تخصیص می‌دهد. در قید (۷) نیز مقدار برچسب ۱ برای اولین یال جهت‌دار انتخاب‌شده از مسیر پشتیبان اختصاص داده می‌شود.

$$Lx_{ab}(r, s, a) = 1 \quad \forall r \in R, a \in N, X_{ab}(r, s, a) = 1 \quad (6)$$

$$\sum_{(s,b) \in L} Ly_{ab}(r, s, b) = 1 \quad \forall r \in R \quad (7)$$

مطابق قید (۸) و (۹)، حداکثر مقدار برچسب برای یال‌های جهت‌دار از مسیر کاری، برابر $(2 * k_{max} - 1) * X_{ab}(r, a, b)$ و حداکثر مقدار برای یال‌های جهت‌دار از مسیر پشتیبان، برابر مقدار $(2 * k_{max} - 1) * Y_{ab}(r, a, b)$ است. با توجه به اینکه یک یال از مسیر پشتیبان می‌تواند بین چند قطعه مشترک باشد، حداکثر مقدار برچسب یال‌های مسیر پشتیبان برابر $(2 * k_{max} - 1) * k_{max}$ است. برای یال‌هایی که جز مسیر کاری و مسیر پشتیبان نیستند، مقدار برچسب صفر است.

$$Lx_{ab}(r, a, p) \leq (2 * k_{max} - 1) * X_{ab}(r, a, b) \quad (8)$$

$$Ly_{ab}(r, a, p) \leq (2 * k_{max} - 1) * Y_{ab}(r, a, b) \quad (9)$$

مطابق قید (۱۰)، اختلاف مقدار برچسب برای دو یال جهت‌دار و پشت سرهم در مسیر کاری، برابر مجموع تعداد یال جهت‌دار پشتیبان عبور کرده از گره میانی است. در این قید، یال‌هایی از مسیر پشتیبان که در جهت عکس مسیر کاری هستند، در نظر گرفته نشده‌اند؛ به عبارت دیگر، میزان افزایش برچسب در گره‌هایی از مسیر کاری که به عنوان گره راهیاب و یا گره ترکیب انتخاب می‌شوند، برابر ۱ و در گره‌هایی که هم گره راهیاب و هم گره ترکیب هستند، برابر ۲ است. در دیگر گره‌ها میزان افزایش برچسب در یال‌های مجاور برابر صفر است.

$$\begin{aligned} Lx_{ab}(r, a, p) - Lx_{ab}(r, q, a) = \\ \sum_{(a,b) \in L} Y_{ab}(r, a, b) + \\ \sum_{\substack{b \neq q \\ (b,a) \in L}} Y_{ab}(r, b, a) \quad \forall r \in R, a, p, q \in N, \\ a \neq s, d, X_{ab}(r, a, p) = X_{ab}(r, q, a) = 1 \end{aligned} \quad (10)$$

در قید (۱۱) با استفاده از برچسب یال‌های جهت‌دار، برچسب لینک‌های کاری برای هر درخواست تعیین می‌شود. متغیر Lx برای تعیین لینک مشترک بین مسیرها و تخصیص مجموعه شیار فرکانسی، استفاده می‌شود.

$$\begin{aligned} Lx(r, Link_num(a, b)) = Lx_{ab}(r, a, b) + \\ Lx_{ab}(r, b, a) \quad \forall r \in R, a, b \in N, a < b, \\ (a, b) \text{ and } (b, a) \in L \end{aligned} \quad (11)$$

قید (۱۲) لینک‌های هر قطعه کاری را تعیین می‌کند. با استفاده از برچسب‌های تخصیص‌داده‌شده به هر لینک از مسیر کاری، لینک‌های مربوط به هر قطعه کاری تعیین می‌شود. لینک با مقدار برچسب ۱ به قطعه اول و لینک با مقدار برچسب $(2 * k - 2)$ و $(2 * k - 1)$ به قطعه k تعلق دارد. اگر یک لینک بین قطعه k و $k-1$ مشترک باشد، به قطعه شماره k تعلق دارد و در زمان اشکال، توسط قطعه پشتیبان شماره k محافظت می‌شود.

که قطعه کاری k_1 از مسیر شماره r و قطعه کاری k_2 از مسیر شماره t حداقل در یکی از لینک‌های شبکه (به عنوان مثال، لینک j) مشترک باشند و مقدار $EPS_Link(r, t, k_1, k_2, j)$ برابر ۱ باشد.

$$a + b - 1 \leq a.b \leq (a + b)/2 \quad (22)$$

$$a \geq a_i \quad \forall i \in L \quad (23)$$

$$a \leq \sum_{i \in L} a_i \quad (24)$$

اگر دو قطعه پشتیبان لینک مشترک داشته و مسیر کاری متناظر آن‌ها نیز لینک مشترک داشته باشند، مجموعه طیف اختصاص داده شده به آن‌ها نباید شیار فرکانسی مشترک داشته باشد. با توجه به قید (۲۵)، متغیر $Sigma$ زمانی مقدار ۱ دریافت می‌کند که دو قطعه پشتیبان و قطعه‌های کاری متناظر آن‌ها لینک مشترک داشته باشند. فرمول (۲۵) در واقع ضرب دودویی دو متغیر $EPS(r, t, k_1, k_2)$ و $Sigma1(r, t, k_1, k_2)$ را به‌ازای قطعه پشتیبان k_1 از مسیر شماره r و قطعه پشتیبان k_2 از مسیر شماره t حساب می‌کند.

$$\begin{aligned} (Sigma1(r, t, k_1, k_2) + EPS(r, t, k_1, k_2) - 1) \leq \\ Sigma(r, t, k_1, k_2) \leq \\ (Sigma1(r, t, k_1, k_2) + EPS(r, t, k_1, k_2)/2) \end{aligned} \quad (25)$$

$$\forall r, t \in R, k_1, k_2 \sim 1..k_{max}, r \neq t \text{ or } k_1 \neq k_2$$

با استفاده از متغیر $Sigma(r, t, k_1, k_2)$ برای هر قطعه پشتیبان اندیس شروع شیار فرکانسی تعیین می‌شود. براساس قید (۲۶) و (۲۷)، اگر دو قطعه پشتیبان و قطعه‌های کاری متناظر لینک مشترک داشته باشند، اختلاف اندیس شروع دو قطعه پشتیبان باید یک عدد بزرگ باشد و اندیس پایانی قطعه پشتیبان با اندیس شروع کوچک‌تر نباید بزرگ‌تر از اندیس شروع قطعه پشتیبان دیگر باشد (عدم پوشانی مجموعه‌های FS مسیر). $Zij(r, t, k_1, k_2)$ یک متغیر دودویی کمکی برای تعیین ترتیب در دو قطعه پشتیبان است. بر طبق قید (۲۶) و (۲۷) مجموعه پیوسته‌ای از FS به قطعه‌ها تخصیص داده می‌شود؛ بنابراین، قید مجاورت طیفی موجود در EON برقرار می‌شود.

$$\begin{aligned} E(t, k_2) - E(r, k_1) \leq \nabla * (1 - Zij(r, t, k_1, k_2) + \\ 1 - Sigma(r, t, k_1, k_2)) - 1 \quad \forall r, t \in \\ R, k_1, k_2 \sim 1..k_{max}, r \neq t \text{ or } k_1 \neq k_2 \end{aligned} \quad (26)$$

$$\begin{aligned} E(r, k_1) + D(r) - E(t, k_2) \leq \nabla * \\ (Zij(r, t, k_1, k_2) + 1 - \\ Sigma(r, t, k_1, k_2)) \quad \forall r, t \in \\ R, k_1, k_2 \sim 1..k_{max}, r \neq t \text{ or } k_1 \neq k_2 \end{aligned} \quad (27)$$

با استفاده از قطعه‌هایی که از لینک عبور می‌کنند، میزان ظرفیت ذخیره شده به‌ازای هر لینک تعیین می‌شود. با استفاده از قیده‌های (۲۸) و (۲۹) متغیر $Pj(r, k, j)$ تعیین می‌شود.

$$Pj(r, k, j) \leq \nabla * YPK(r, k, j) \quad \forall r \in R, k \sim 1..k_{max}, j \in L \quad (28)$$

$$0 \leq (E(r, k) + D(r)) - Pj(r, k, j) \leq \nabla * (1 - YPK(r, k, j)) \quad \forall r \in R, k \sim 1..k_{max}, j \in L \quad (29)$$

با استفاده از قید (۳۰) حداکثر اندیس شیار فرکانسی ذخیره شده در هر لینک شبکه تعیین می‌شود. به دلیل آنکه تنها به قطعه‌های پشتیبان

یال‌هایی از مسیر پشتیبان تجمعی که از مسیر کاری عبور می‌کند، جز یال‌های قطعه‌های پشتیبان نیست و تنها برای ایجاد پیوستگی و برچسب‌گذاری مسیر پشتیبان از گره مبدأ تا مقصد مورد استفاده قرار گرفته است؛ بنابراین، این لینک‌ها در تعیین لینک‌های قطعه پشتیبان مورد استفاده قرار نمی‌گیرند. طبق قید (۱۷)، $YY_{ab}(r, b, a)$ لینک‌های پشتیبان و طبق قید (۱۸)، $LLY_{ab}(r, b, a)$ برچسب آن‌ها را بدون در نظر گرفتن لینک‌های مشترک با مسیر کاری، مشخص می‌کند.

$$YY_{ab}(r, b, a) = Y_{ab}(r, b, a) * (1 - X_{ab}(r, a, b)) \quad \forall r \in R, a, b \in N, (a, b) \in l \quad (17)$$

$$LLY_{ab}(r, b, a) = LY_{ab}(r, b, a) * (1 - X_{ab}(r, a, b)) \quad \forall r \in R, a, b \in N, (a, b) \in l \quad (18)$$

با توجه به برچسب‌گذاری انجام شده، در قید (۱۹) و (۲۰) یال‌های جهت-دار هر قطعه پشتیبان از یک درخواست تعیین می‌شود. یال با برچسب ۱ به قطعه اول و یال با برچسب $(2 * k - 1)$ به قطعه شماره k تعلق دارد.

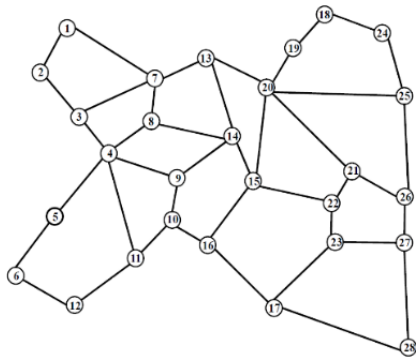
$$\sum_{k \sim 1..k_{max}} (2k - 1) * YK_{ab}(r, k, a, b) = LLY_{ab}(r, a, b) \quad \forall r \in R, a, b \in N, (a, b) \in l \quad (19)$$

$$\sum_{k \sim 1..k_{max}} YK_{ab}(r, k, a, b) = YY_{ab}(r, a, b) \quad \forall r \in R, a, b \in N, (a, b) \in l \quad (20)$$

در قید (۲۱) باتوجه به یال‌های جهت‌دار هر قطعه پشتیبان، لینک‌های هر قطعه پشتیبان تعیین می‌شود.

$$\begin{aligned} YPK(r, k, L(a, b)) = YK_{ab}(r, k, a, b) + \\ YK_{ab}(r, k, b, a) \quad \forall r \in R, k \sim 1..k_{max}, a, b \in N, (a, b) \text{ and } (b, a) \in l \end{aligned} \quad (21)$$

پس از مشخص شدن لینک‌های هر قطعه پشتیبان، باید عمل تخصیص طیف انجام شود. برای برقرارکردن قید پیوستگی طیفی در قطعه‌ها، مجموعه شیار فرکانسی به‌جای لینک، به مسیر هر قطعه تخصیص داده می‌شود [۱۰]؛ به‌همین دلیل، باید مشخص شود که هر قطعه پشتیبان با کدام قطعه‌های دیگر لینک مشترک دارد. برای تعیین قطعه‌هایی که لینک مشترک دارند، در ابتدا لینک‌هایی را که بین هر دو قطعه مشترک است، مشخص می‌شود و مقدار ماتریس‌های $EPS_Link(r, t, k_1, k_2, j)$ و $Sigma_Link(r, t, k_1, k_2, j)$ تعیین می‌شود. رابطه (۲۲) ضرب دودویی دو متغیر را با استفاده فرمول‌بندی ILP نشان می‌دهد. با استفاده از این رابطه، لینک‌های مشترک بین هر جفت قطعه تعیین می‌شود. به‌عنوان مثال، اگر $XPk(r, k_1, j)$ و $XPk(t, k_2, j)$ برابر ۱ باشد، یعنی قطعه کاری شماره k_1 از مسیر شماره r و قطعه کاری شماره k_2 از مسیر شماره t از لینک j عبور می‌کنند. بنابراین، دو قطعه ذکر شده در لینک j مشترک هستند و مقدار $EPS_Link(r, t, k_1, k_2, j)$ برابر ۱ می‌شود. اگر دو قطعه کاری یا پشتیبان حداقل در یک لینک شبکه مشترک باشند، متغیرهای EPS یا $Sigma1$ مقدار یک دریافت می‌کند. رابطه (۲۳) و (۲۴) نحوه تعیین دو متغیر $EPS(r, t, k_1, k_2)$ و $Sigma1(r, t, k_1, k_2)$ را به‌ترتیب از دو متغیر $EPS_Link(r, t, k_1, k_2, j)$ و $Sigma_Link(r, t, k_1, k_2, j)$ نشان می‌دهد. برای مثال، $EPS(r, t, k_1, k_2)$ زمانی مقدار ۱ دریافت می‌کند



شکل ۶: همبندی ۲

در شکل ۷ و ۸ تعداد FS ذخیره‌شده در قطعه‌های پشتیبان به‌ازای هر شبیه‌سازی در دو حالت محافظت مسیر و مبتنی بر قطعه‌بندی پیشنهادشده، نشان داده شده است. در روش پیشنهادشده برای قطعه‌بندی برای EON، طول مسیرها کوتاه‌تر می‌شود و تعداد قطعه‌های کاری که با یکدیگر لینک مشترک دارند، کمتر می‌شود؛ بنابراین، احتمال به-اشتراک‌گذاری طیف در قطعه‌های پشتیبان با لینک مشترک، بالا می‌رود و ظرفیت یدکی کل ذخیره‌شده در شبکه کمتر می‌شود. میانگین ظرفیت یدکی کل ذخیره‌شده در دو همبندی در شکل ۹ نشان داده شده است. متوسط درجه گره‌ها در همبندی ۱ برابر ۳/۴۷ است. این مقدار برای همبندی ۲ برابر ۲/۹۳ است. برای همبندی‌هایی که متوسط درجه گره زیاد است، مسیرهایی که بین جفت گره‌ها ایجاد می‌شود طول کمتری دارند. به‌عین دلیل، متوسط ظرفیت یدکی کل ذخیره‌شده در دو حالت مختلف محافظت، برای همبندی ۱ کمتر از همبندی ۲ است. در هر همبندی میزان ظرفیت یدکی استفاده در محافظت مسیر مشترک بیشتر از محافظت قطعه مشترک پیشنهادشده جدید است.

معیار دوم برای مقایسه دو روش محافظت، ظرفیت یدکی افزونه [۱۰] است. این معیار نسبت کل ظرفیت یدکی به کل ظرفیت کاری را مورد بررسی قرار می‌دهد. به‌دلیل اینکه برای دو روش محافظت، جفت گره‌های مشابهی برای درخواست‌های ورودی در نظر گرفته شده است و اشتراک‌گذاری ظرفیت در مسیرهای کاری وجود ندارد، روش محافظتی که ظرفیت یدکی ذخیره‌شده بیشتری دارد، نسبت ظرفیت یدکی افزونه بیشتری نیز دارد.

معیار دیگر که دو روش محافظت مسیر و مبتنی بر قطعه‌بندی بر-طبق آن مقایسه می‌شوند، تحمل‌پذیری در برابر اشکال‌های هم‌زمان لینک‌ها است. اگر مسیر کاری و مسیر پشتیبان یک درخواست هم‌زمان دچار آسیب شود، جریان داده این درخواست از بین رفته و از شبکه انتقال داده نمی‌شود. برای درخواست‌هایی که طول مسیر کاری و مسیر پشتیبان بزرگ‌تر است، احتمال اینکه لینک‌های آسیب‌دیده جز مسیر کاری و مسیر پشتیبان باشند، بیشتر است. در این پژوهش، ۱۰ لینک از شبکه به‌صورت تصادفی انتخاب شده‌اند. در هر حالت، i تعداد $(1 \leq i \leq 10)$ از ۱۰ لینک به‌صورت هم‌زمان آسیب می‌بینند. متوسط تعداد

طیف اختصاص داده شده است، مجموع $P(j)$ به‌ازای تمام لینک‌های شبکه، میزان ظرفیت یدکی کل ذخیره‌شده در شبکه را نشان می‌دهد. در تابع هدف شیارهای فرکانسی میانی آزاد نیز کمینه می‌شود. در شمارش و مقایسه تعداد شیار فرکانسی یدکی ذخیره‌شده در دو روش محافظت، شیارهای فرکانسی آزاد در نظر گرفته نمی‌شود.

$$P(j) \geq P_j(r, k, j) \quad \forall r \in R, k \sim 1..k_{max}, j \in L \quad (30)$$

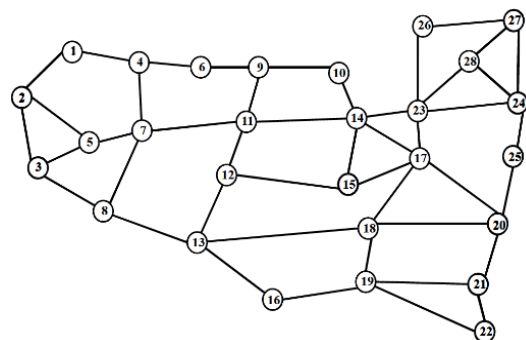
به‌منظور توزیع یکسان ترافیک در کل شبکه، حداکثر اندیس شیار فرکانسی ذخیره‌شده تعیین و به‌عنوان یکی از متغیرهای تابع هدف کمینه می‌شود.

$$c \geq P(j) \quad \forall j \in L \quad (31)$$

۴- ارزیابی و تحلیل نتایج

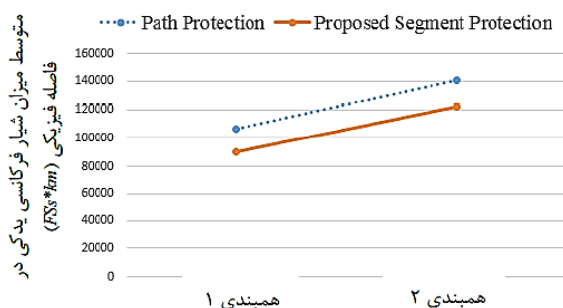
مسأله مدل‌سازی‌شده با ILP، توسط نرم‌افزار AMPL (۶۴ بیتی) [۱۸] به‌همراه حل‌کننده Gurobi [۱۹] نسخه ۲۰۱۶ حل شده است. برای ارزیابی کارایی دو روش محافظت SBPP و SSP در شبکه EON، همبندی شکل ۵ و شکل ۶ استفاده شده است.

برای هر جفت گره موجود در شبکه، کوتاه‌ترین مسیر به‌عنوان مسیر کاری، از قبل مشخص است. در هر اجرای شبیه‌سازی، ۶ جفت گره به‌صورت تصادفی انتخاب و به‌عنوان مبدأ و مقصد درخواست‌ها، هم‌زمان وارد شبکه می‌شود. با درنظرگرفتن وجود یا عدم وجود قابلیت تغییر فرکانسی گره‌ها، دو روش محافظت مسیر و محافظت قطعه مشترک بررسی می‌شود. در حالتی که گره‌های شبکه قابلیت تغییر فرکانسی دارند، قطعه‌بندی برای یک مسیر، زمانی اتفاق می‌افتد که با درنظرگرفتن درخواست‌های ورودی هم‌زمان، میزان ظرفیت یدکی کل ذخیره‌شده کمتر از حالت محافظت مسیر شود؛ بنابراین، اگر با قطعه‌بندی یک مسیر، میزان ظرفیت یدکی استفاده‌شده از شبکه بیشتر از حالت محافظت مسیر باشد، قطعه‌بندی برای درخواست مورد نظر انجام نمی‌شود. تعداد شبیه‌سازی انجام‌شده برای هر همبندی برابر ۲۰ است.

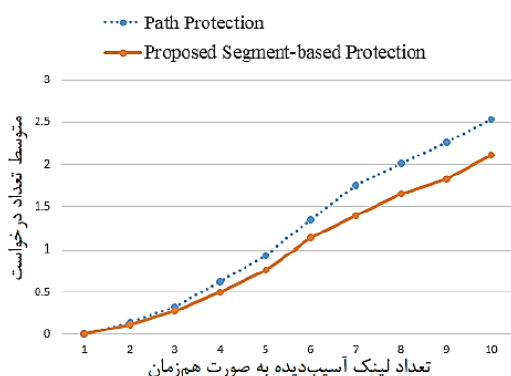


شکل ۵: همبندی ۱

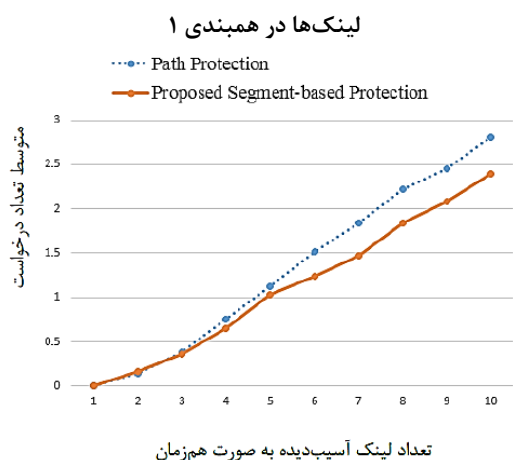
۱، میزان مصرف ظرفیت یدکی کل نسبت به محافظت مسیر مشترک ۱۴/۵ درصد کمتر است. این مقدار برای همبندی ۲ برابر ۱۲/۵ درصد است؛ به عبارت دیگر، با ایجاد این قابلیت تنها در ۲۵ درصد از گره‌های شبکه هم‌چنان میزان بهبود در ظرفیت یدکی مورد نیاز نسبت به حالت محافظت مسیر قابل توجه است. نتایج در جدول ۲ نشان داده شده است. میزان ظرفیت یدکی استفاده شده در سه حالت ۱- محافظت مسیر مشترک، ۲- محافظت قطعه مشترک با در نظر گرفتن قابلیت تغییر بازه‌ی فرکانسی در ۲۵ درصد از گره‌های شبکه و ۳- محافظت قطعه مشترک در حالتی که تمام گره‌ها به قابلیت تغییر بازه‌ی فرکانسی مجهز هستند، نشان داده شده است.



شکل ۹: متوسط ظرفیت یدکی ذخیره‌شده در دو همبندی



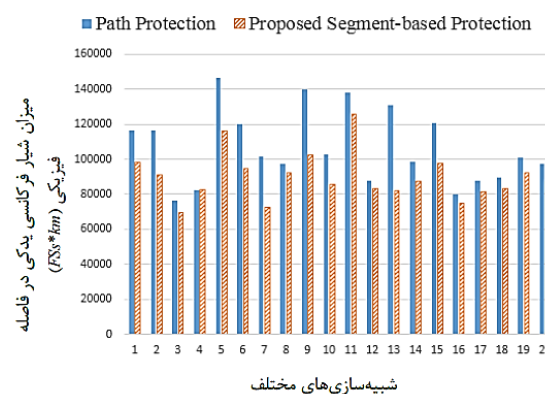
شکل ۱۰: متوسط تعداد درخواست آسیب‌دیده در اشکال هم‌زمان



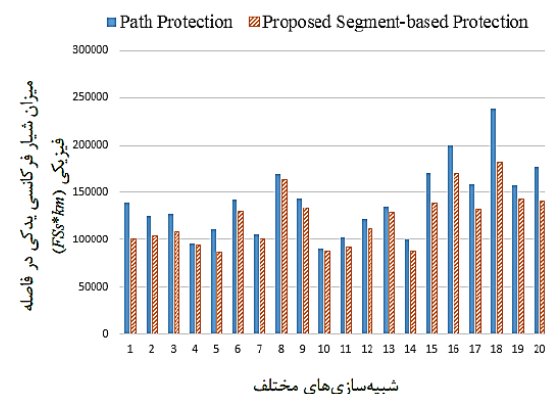
شکل ۱۱: متوسط تعداد درخواست آسیب‌دیده در اشکال هم‌زمان

لینک‌ها در همبندی ۲

درخواست‌هایی که جریان داده آن‌ها از بین می‌رود، در هر یک از حالت‌ها تعیین می‌شود. شکل ۱۰ و ۱۱ متوسط تعداد درخواست از بین رفته را در بین ۶ جفت درخواست ورودی نشان می‌دهد. با توجه به نتایج شبیه‌سازی، محافظت مبتنی بر قطعه‌بندی، مقاومت بالایی نسبت به آسیب هم‌زمان چند لینک^{۲۴} در شبکه دارد. هر چه قدر تعداد لینک‌هایی که به صورت هم‌زمان دچار آسیب شده‌اند، بیشتر می‌شود، متوسط تعداد درخواستی که در محافظت مسیر مشترک از بین می‌رود، بیشتر از متوسط تعداد درخواست در محافظت مبتنی بر قطعه‌بندی می‌شود. در این پژوهش، در ابتدا فرض شده است که تمام گره‌ها قابلیت تغییر بازه فرکانسی را دارند و عمل مسیریابی و تعیین قطعه‌های پشتیبان برای هر کدام از قطعه‌های کاری انجام شده است. نتایج نشان می‌دهد که در همبندی ۱، میزان مصرف ظرفیت یدکی در محافظت قطعه مشترک نسبت به محافظت مسیر مشترک ۱۵/۵ درصد کمتر است. این مقدار برای همبندی ۲ برابر ۱۳/۵ درصد است.



شکل ۷: ظرفیت یدکی ذخیره‌شده در دو روش محافظت در همبندی ۱



شکل ۸: ظرفیت یدکی ذخیره‌شده در دو روش محافظت در همبندی ۲

به دلیل اینکه استفاده از گره‌های با قابلیت تغییر بازه‌ی فرکانسی هزینه‌ی بالایی دارند. در مرحله دوم، عملکرد روش مبتنی بر قطعه‌بندی در حالتی که تنها ۲۵ درصد گره‌های مرکزی شبکه به قابلیت تغییر بازه فرکانسی مجهز باشند، بررسی و ارزیابی شد. گره‌های انتخاب‌شده درجه بالاتری نسبت به سایر گره‌های شبکه دارند. در این حالت، در همبندی

جدول ۲: میزان شیار فرکانسی یدکی در فاصله فیزیکی ($FSs*km$)

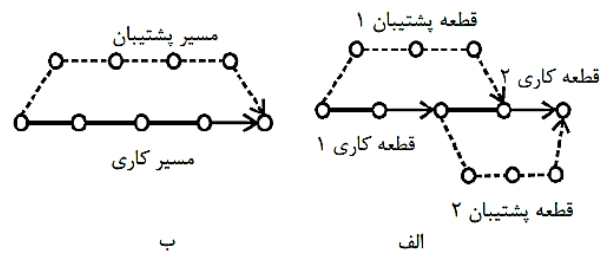
محافظة	همبندی	همبندی ۱	همبندی ۲
محافظة مسیر مشترک		۱۰۶۵۴۷	۱۴۰۷۰۹
محافظة قطعه مشترک (۲۵ درصد گره‌ها قابلیت تغییر بازه فرکانسی دارند)		۹۱۱۰۳	۱۲۳۰۶۰
محافظة قطعه مشترک (تمام گره‌ها قابلیت تغییر بازه فرکانسی دارند)		۹۰۰۰۸	۱۲۱۸۶۹

با توجه به رابطه‌های بیان شده، اگر مجموع طول قطعه‌های پشتیبان برابر طول مسیر پشتیبان باشد، احتمال از بین رفتن درخواست در حالت محافظت مسیر دو برابر احتمال از بین رفتن درخواست در حالت محافظت است؛ بنابراین، حداکثر مجموع طول قطعه‌های پشتیبان در حالتی که مسیر به دو قطعه با طول یکسان تقسیم شده باشد و احتمال از بین رفتن درخواست در محافظت مسیر نباشد، دو برابر طول مسیر پشتیبان در محافظت مسیر است. در حالتی که دو لینک شبکه به صورت هم‌زمان آسیب دیده‌اند، اگر تعداد قطعه ایجاد شده (با طول یکسان) بر روی مسیر کاری k_1 باشد، حداکثر مجموع طول قطعه‌های پشتیبان، برای اینکه احتمال از بین رفتن درخواست در حالت محافظت قطعه بیشتر از محافظت مسیر نباشد، k_1 برابر مسیر پشتیبان در محافظت مسیر است؛ بنابراین، محافظت قطعه در مقایسه با محافظت مسیر، مقاومت بیشتری نسبت به اشکال هم‌زمان لینک‌ها در شبکه دارد.

۵- نتیجه

در این مقاله، یک مدل بهینه‌سازی برای قطعه‌بندی مسیر کاری برای EON در مرحله طراحی شبکه ارائه شده است. میزان ظرفیت یدکی استفاده شده و مقاومت در برابر اشکال هم‌زمان لینک‌ها در دو روش محافظت مبتنی بر قطعه‌بندی و محافظت مسیر مورد بررسی و مقایسه قرار گرفته است. با استفاده از روش برچسب‌گذاری، مسیر کاری به چند قطعه مستقل از هم تقسیم می‌شود و هر یک از قطعه‌ها به صورت مجزا محافظت می‌شود. برای محافظت قطعه مشترک در ابتدا فرض شده است، تمام گره‌های میانی شبکه قابلیت تغییر بازه فرکانسی دارند. با توجه به نتایج به دست آمده، به طور میانگین میزان مصرف ظرفیت یدکی کل در محافظت قطعه مشترک ۱۴/۵ درصد کمتر از محافظت مسیر مشترک است. با توجه به هزینه بالای گره‌ها با قابلیت تغییر بازه فرکانسی، در مرحله دوم تنها ۲۵ درصد از گره‌های مرکزی شبکه به قابلیت تغییر بازه فرکانسی مجهز شدند. نتایج نشان داد که به طور متوسط ۹۳ درصد از میزان ظرفیت یدکی کل کاهش یافته در محافظت قطعه مشترک نسبت به محافظت مسیر مشترک توسط ۲۵ درصد از گره‌های شبکه با قابلیت تغییر بازه فرکانسی تأمین می‌شود. محافظت قطعه مشترک نسبت به محافظت مسیر مقاومت بیشتری در برابر اشکال هم‌زمان لینک‌ها دارد. در پژوهش‌های آتی هدف این است که مصالحه بین تعداد گره‌ها با قابلیت تغییر بازه فرکانسی و میزان ظرفیت یدکی کل صرفه‌جویی شده توسط SSP مورد بررسی قرار گرفته شود و در مورد تعداد بهینه گره‌ها با قابلیت تغییر بازه فرکانسی بحث شود. در واقع، گره‌هایی تعیین می‌شود که بیشترین تأثیر را در کمینه‌سازی ظرفیت یدکی کل دارند؛ به عبارت دیگر، گره‌هایی به قابلیت تغییر بازه فرکانسی مجهز می‌شوند که درصد بالایی از اختلاف ظرفیت یدکی کل در دو روش محافظت توسط این تعداد گره صرفه‌جویی شود و هزینه‌ی تحمیل شده به شبکه توسط گره‌های پرهزینه کمتر شود.

مطابق آنچه که در شکل ۱۲ نشان داده شده است، فرض شده است برای یک مسیر کاری دو روش محافظت مسیر و محافظت مبتنی بر قطعه‌بندی وجود دارد. فرض شده است لینک i و j ($i \neq j$) به صورت هم‌زمان دچار آسیب شده‌اند. طول مسیر کاری و مسیر پشتیبان در محافظت مسیر به ترتیب L_1 و L_2 گام است. مسیر کاری به دو قطعه کاری با طول یکسان $L_{1,1} = L_{1,2} = T = \frac{1}{2} * L_1$ تقسیم می‌شود ($L_{1,1} + L_{1,2} = L_1$). مسیر پشتیبان شامل دو قطعه $L_{2,1}$ و $L_{2,2}$ است. احتمال اینکه درخواست توافیقی مورد نظر در دو روش محافظت از بین برود و ترافیک آن از شبکه عبور نکند، طبق رابطه (۳۲) و (۳۳) محاسبه می‌شود.



شکل ۱۲: محافظت مسیر و محافظت قطعه برای یک جفت گره

در محافظت مسیر احتمال اینکه یکی از لینک‌های آسیب‌دیده جز مسیر کاری و لینک دیگر جز مسیر پشتیبان باشد، از رابطه (۳۲) به دست می‌آید. تعداد لینک‌های شبکه K فرض شده است. به دلیل وجود دو جایگشت مختلف برای دو لینک i و j احتمال از بین رفتن درخواست دو برابر می‌شود.

$$\text{Drop probability} = \frac{L_1}{k} * \frac{L_2}{k} * 2 = \frac{2 * L_1 * L_2}{k * k} \quad (32)$$

در محافظت مبتنی بر قطعه‌بندی، اگر مسیر کاری و مسیر پشتیبان حداقل یکی از قطعه‌ها از بین برود، اتصال قطع می‌شود؛ بنابراین، احتمال از بین رفتن درخواست با فرض از بین رفتن هم‌زمان لینک i و لینک j از رابطه (۳۳) به دست می‌آید.

$$\text{Drop probability} = \frac{T}{K} * \frac{L_{2,1}}{K} * 2 + \frac{T}{K} * \frac{L_{2,2}}{K} * 2 = \frac{2 * T * (L_{2,1} + L_{2,2})}{K * K} \quad (33)$$

مراجع

- Communications Surveys and Tutorials, vol. 15, issue 1, pp. 65-87, 2013.
- [10] G. Shen, Y. Wei and S. K. Bose "Optimal design for shared backup path protected elastic optical networks under single-link failure," *Optical Communications and Networking Journal*, vol. 6, issue. 7, pp. 649-659, 2014.
- [۱۱] معصومه واعظی، محمدعلی جبرئیل جمالی، «پروتکل مسیریابی جدید مبتنی بر کیفیت خدمات در شبکه‌های حسگر بی‌سیم با تحلیل سلسله مراتبی»، *مجله مهندسی برق دانشگاه تبریز*، جلد ۴۶، شماره ۲، تابستان ۹۵.
- [12] E. Bouillet, G. Ellinas, J. F. Labourdette and R. Ramamurthy, *Path Routing in Mesh Optical Networks*, Wiley Publishing, 2007.
- [13] J. Tapolcai, P. H. Ho, P. Babarczy and L. Ronyai, *Internet Optical Infrastructure Issues on Monitoring and Failure Restoration*, Springer Publishing, 2015.
- [14] P. H. Ho, J. Tapolcai and T. Cinkler, "Segment shared protection in mesh communications networks with bandwidth Guaranteed tunnels," *IEEE/ACM Transactions on Networking Journal*, vol. 12, issue. 6, pp. 1105-1118, 2004.
- [15] J. Tapolcai and P. H. Ho, "Dynamic survivable routing for shared segment protection," *Communications and Networks Journal*, vol. 9, no. 2, pp. 198-209, 2007.
- [16] D. Xu, Y. Xiong and C. Qiao, "Protection with multi-segments (PROMISE) in networks with shared risk link groups (SRLG)," *Proceedings of 40th Annual Allerton Conference on Communication, Control, and Computing*, 2002.
- [17] Q. V. Phung, D. Habibi, H. N. Nguyen and K. M. Lo, "A segmentation method for shared protection in wdm mesh networks," *Proceedings of 14th IEEE International Conference on Networks*, vol. 2, pp.1-6, 2006.
- [18] AMPL [online]. Available: <http://ampl.com>.
- [19] Gurobi [online]. Available: <http://www.gurobi.com>.
- [1] G. Shen, H. Guo and S. K. Bose, "Survivable elastic optical networks: survey and perspective (invited)," *Photonic Network Communications*, vol. 31, issue 1, pp. 71-87, 2016.
- [2] J. L. Vizcaino, Y. Ye, V. Lopez, F. Jimenez, F. Musumeci, M. Tornatore, A. Pattavina and P. M. Krummrich, "Protection in optical transport networks with fixed and flexible grid: cost and energy efficiency evaluation," *Optical Switching and Networking*, vol. 11, issue 1, pp. 55-71, 2014.
- [3] O. Gerstel, M. Jinno, A. Lord and S. J. B. Yoo, "Elastic optical networking: a new dawn for the optical layer?," *IEEE Communications Magazine*, vol. 50, issue 2, pp. 12-20, 2012.
- [4] I. P. Kaminow, T. Li and A. E. Willner, *Optical Telecommunications VIB Systems and Networks*, Elsevier, 2013.
- [5] F. Shirin Abkenar and A. Ghaffarpour Rahbar, "Study and analysis of routing and spectrum allocation (RSA) and routing, modulation and spectrum allocation (RMSA) algorithms in elastic optical networks (EONs)," *Optical Switching and Networking Journal*, vol. 23, part 1, pp. 5-39, 2017.
- [6] S. Talebi, F. Alam, I. Katib, M. Khamis, R. Salama and G. N. Rouskas, "Spectrum management techniques for elastic optical networks: a survey," *Optical Switching and Networking*, vol. 13, pp. 34-48, 2014.
- [7] K. Christodouloupoloulos, I. Tomkos and E. A. Varvarigos, "Elastic bandwidth allocation in flexible ofdm-based optical networks," *Lightwave Technology Journal*, vol. 29, Issue 3, pp. 1354-1366, 2011.
- [۸] گلاره عزیزی، علیرضا عبدالله‌پوری، «تخصیص منابع در شبکه‌های WiMAX مبتنی بر OFDMA برای سیستم‌های IPTV با استفاده از الگوریتم ژنتیک»، *مجله مهندسی برق دانشگاه تبریز*، جلد ۴۶، شماره ۳، پاییز ۹۵.
- [9] G. Zhang, M. D. Leenheer, A. Morea and B. Mukherjee "A survey on ofdm-based elastic core optical networking," *IEEE*

زیر نویس‌ها

- ¹ Wavelength Division Multiplexing (WDM)
- ² International Telecommunications Union- Telecommunication Standardization Sector (ITU-T)
- ³ Elastic Optical Network (EON)
- ⁴ Orthogonal Frequency Division Multiplexing (OFDM)
- ⁵ Inter symbol Interference (ISI)
- ⁶ Frequency Slot (FS)
- ⁷ Guard band
- ⁸ Worldwide Interoperability for Microwave Access (WiMAX)
- ⁹ Orthogonal Frequency Division Multiple Access (OFDMA)
- ¹⁰ Quality of Service (QoS)
- ¹¹ Switch Node
- ¹² Spectrum Contiguity
- ¹³ Spectrum Continuity
- ¹⁴ Routing and spectrum assignment (RSA)
- ¹⁵ Failure recovery
- ¹⁶ Protection
- ¹⁷ Restoration
- ¹⁸ Dedicated backup path protection (DBPP)
- ¹⁹ Shared backup path protection (SBPP)
- ²⁰ Integer Linear programming (ILP)
- ²¹ Shared segment protection (SSP)
- ²² Merge node
- ²³ Mass protection path
- ²⁴ Multi-link failure