

تخصیص منابع در نگاشت شبکه‌های مجازی به شبکه نوری برای زیرساخت ابری

صادق جمالزاده^۱، فاطمه صالح نژاد^۲ و لطف‌الله بیگی^۳

^۱دانشجوی دانشگاه صنعتی خواجه‌نصیرالدین طوسی، jamalzadeh@email.knu.ac.ir

^۲دانشجوی دانشگاه صنعتی خواجه‌نصیرالدین طوسی، salehnejad@email.kntu.ac.ir

^۳استادیار دانشکده مهندسی برق دانشگاه خواجه‌نصیرالدین طوسی، beygi@cetd.kntu.ac.ir

چکیده - کاربردهای جدید اینترنت به‌طور چشمگیری در حال توسعه است که این کاربردها مبتنی بر شبکه نوری و سرویس‌های شبکه ابری است. افزایش این نوع کاربردها، ضرورت وجود یک زیرساخت نوری و ابری انعطاف‌پذیر و بهینه را می‌طلبد. مجازی‌سازی به دلیل مزیت‌هایی که به همراه دارد همچون؛ مقیاس‌پذیری، تخصیص منابع بلادرنگ و استفاده بهینه از منابع شبکه، به‌عنوان یک روش اساسی برای معماری آینده اینترنت در نظر گرفته می‌شود. نگاشت شبکه مجازی به شبکه بستر به‌عنوان یک چالش در حوزه مجازی‌سازی است که در این مقاله با حفظ بهره‌وری انرژی این نگاشت صورت گیرد. در این مقاله مدل ارائه‌شده شبکه سه لایه ای *IP-OTN-WDM* است و توان مصرفی منابع شبکه و دیتاسنترها در نظر گرفته شده است. برای کمینه کردن توان مصرفی از روش *MILP* استفاده شده است. روش شهودی به‌عنوان یک راه حل سریع در راستای کاهش پیچیدگی، در دو مرحله ارائه شده است. در مرحله اول به نگاشت گره‌های شبکه مجازی به شبکه بستر پرداخته شده است و در مرحله دوم نگاشت لینک درخواست‌های مجازی همراه با عمل گرومینگ در لایه *OTN* انجام شده است که در نتیجه آن باعث کاهش ۲۳ درصدی توان مصرفی کل شبکه شده است.

کلید واژه - بهره‌وری انرژی، پردازش ابری، ترافیک گرومینگ، شبکه‌های مخابرات نوری، نگاشت شبکه مجازی.

شبکه از راه دور و از طریق کنترل‌کننده‌ی شبکه امکان‌پذیر می‌کند؛ بنابراین، SDN می‌تواند ارتباط بیشتری بین درخواست‌های مجازی و نحوه‌ی نگاشت به منابع فیزیکی برقرار کند. تخصیص منابع با استفاده از الگوریتم‌هایی عموماً شناخته‌شده به‌عنوان الگوریتم‌های نگاشت شبکه مجازی^۱ (VNE) [۴، ۵، ۶] انجام می‌شود. نگاشت منابع مجازی به توپولوژی شبکه بستر، موجب استفاده حداکثری از منابع می‌شود.

مجازی‌سازی شبکه اجازه وجود هم‌زمان و مشترک چند شبکه مجازی را در یک بستر فیزیکی، که به‌عنوان شبکه بستر^۲ شناخته می‌شود را می‌دهد. مجازی‌سازی شبکه جزئی قدرتمند برای درک چارچوب کاری IaaS^۳ در شبکه‌های ابری است. در چند سال اخیر، توجه بسیاری به مسائل مربوط به نگاشت شبکه مجازی می‌شود و از دیدگاه‌های مختلف موردبررسی قرار گرفته است. بایان رهیافت-های ILP و شهودی مختلف تلاش می‌شود تا با استفاده از

۱- مقدمه

خدمات شبکه ابری به‌عنوان یک مؤلفه اساسی در زیرساخت فناوری اطلاعات است که فرصت مناسبی را برای ارائه‌دهندگان خدمات اینترنت و اپراتورهای مخابراتی فراهم می‌کند تا از این طریق کسب درآمد کنند. بسیاری از شرکت‌ها خدمات خود را به سمت زیرساخت‌های ابری سوق می‌دهند. تخمین‌ها نشان می‌دهد که اگر روندهای کنونی ادامه یابند، در طولانی‌مدت، قبض انرژی سالانه‌ای که به‌وسیله اپراتورهای دیتاسنترها پرداخت می‌شود از هزینه تجهیزات بسیار بیشتر خواهد بود [۱]. با توجه به تأثیر اقتصادی و زیست‌محیطی، هر دو بخش آکادمیک (علمی) و صنعت روی توسعه الگوهای بهره‌وری انرژی برای رایانش ابری تمرکز کردند [۲].

ارائه دهندگان زیرساخت چارچوبی برای تخصیص منابع دارند که مشخص می‌کنند چگونه منابع فیزیکی را به گره‌ها و لینک‌های مجازی تخصیص دهند. در [۳]، شبکه تعریف‌شده نرم‌افزاری (SDN) برای ارائه انعطاف‌پذیری شبکه معرفی شده است، جایی که کنترل

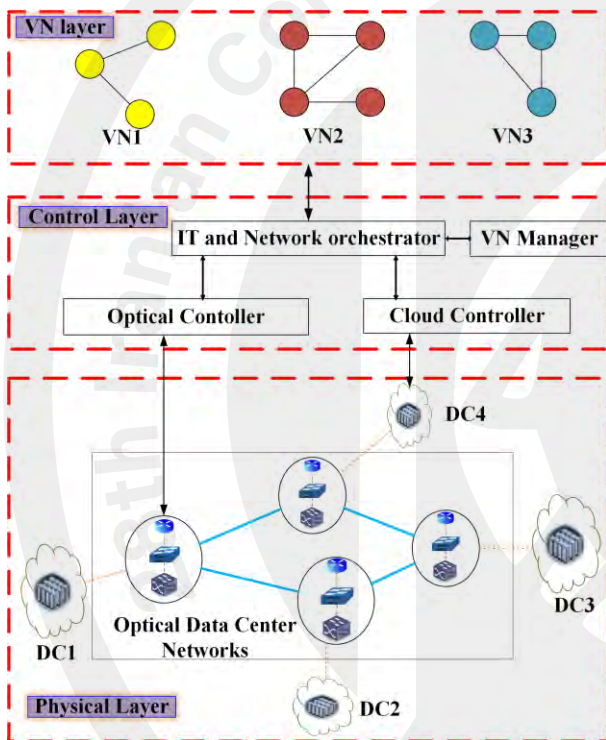
^۱ Virtual Network Embedding

^۲ Substrate Network

^۳ Infrastructure as a Service

۲- معماری شبکه

معماری شبکه به صورت سه لایه تعریف می شود که با توجه به شکل ۱، شامل لایه فیزیکی، کنترلی و VN^5 است. در لایه فیزیکی، دیتاسنترهایی که در سطح جهان توزیع شده اند توسط شبکه های چند دامنه ای^۶ باهم در ارتباطند تا درخواست های لایه VN را تحقق بخشند. VN های مختلف به طور مشترک و موازی بر روی یک بستر زیرساختی اجرا می شوند و این همزیستی بین آن ها در یک بستر فیزیکی به گونه ای کاملاً مجزا انجام می شود که هیچ تداخلی ایجاد نمی کند.



شکل ۱. معماری سه لایه: VN ، لایه کنترلی، لایه فیزیکی

لایه کنترلی رابط بین لایه VN و لایه فیزیکی است، به این گونه که تنظیم کننده شبکه و IT می تواند اطلاعات توپولوژی را از سایر کنترل کننده ها دریافت کند و در بخش مدیریت VNM^7 بعد از دریافت اطلاعات توپولوژی و درخواست های VN ، الگوریتم VNE اجرا می شود.

در این مقاله شبکه فیزیکی مورد نظر شبکه سه لایه $IP-OTN-WDM$ است که با توجه به شکل ۲، متشکل از سه لایه بنام لایه

رویکردهای پیشنهادی از پیچیدگی مسئله کاسته شود. بهره وری انرژی در دیتاسنتر و شبکه های انتقال نوری به دلیل اهمیت روزافزون آن به طور گسترده مورد بررسی قرار گرفته است. برای شبکه نوری، مدل های مصرف انرژی بیان شده متفاوتی [۷،۸،۹] از شبکه را تحلیل کرده اند (به عنوان مثال، طراحی شبکه مؤثر انرژی و مسیریابی). برای دیتاسنتر، بسیاری از محققان بر بهره وری انرژی دیتاسنترها تمرکز کرده اند. در [۱۰،۱۱]، یک بررسی و مدل سازی جامع در مورد مؤلفه های مصرف انرژی انجام شده است. در مقاله [۱۲] نداشت شبکه مجازی با رهیافت بهره وری انرژی برای شبکه های ابری مورد بررسی قرار گرفته است. در این مقاله با ارائه یک مسئله $MILP^8$ و روش شهودی به نداشت گره ها و لینک های مجازی به شبکه بستر پرداخته شده است، به گونه ای که توان مصرفی شبکه کاهش یابد. در مقاله ای دیگر [۱۳] نیز روش فعال سعی در بهینه کردن توان مصرفی کل شبکه را دارد. به علاوه اینکه مکان گره ها و تأخیر لینک ها جهت واقعی تر شدن شرایط هم در نظر گرفته شده است. از راه حل های مهم در زمینه بهره وری انرژی استفاده از روش گرمینگ است. در [۱۴] در دو بخش به تخصیص منابع با در نظر گرفتن بهره وری انرژی پرداخته شده است که در بخش اول آن، به مسیریابی و گرمینگ پرداخته است تا تعداد تقویت کننده ها و تعداد ترنسپوندرهای فعال شبکه را کم کند. در این مقاله، الگوریتم VNE برای بهره وری انرژی در شبکه ابری ارائه شده است که با محاسبه مقدار مصرف انرژی اجزای مختلف شبکه و سرورها به دست می آید. با الهام از [۱۲]، یک مدل $MILP$ پیشنهاد می کنیم که میزان مصرف انرژی کل را برای دیتاسنتر و شبکه نوری به حداقل برساند. در ادامه، مقاله به این صورت بخش بندی می شود که: بخش دوم معماری شبکه را تشریح می کند. در بخش سوم، تعریف مسئله ارائه شده است. در بخش چهارم، روش $MILP$ و الگوریتم شهودی برای VNE معرفی شده است. نتایج و بحث های شبیه سازی در بخش ششم ارائه شده است. بخش هفتم این مقاله به نتیجه گیری مسئله پرداخته شده است.

^۵ Virtual Network

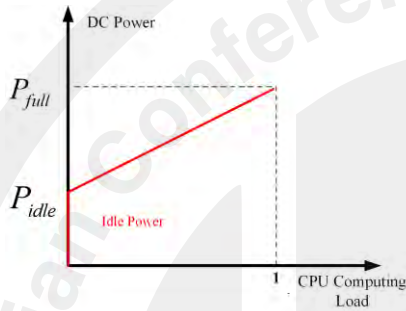
^۶ Multi-domain Networks

^۷ VN Manager

^۸ Mixed Integer Linear Programming

ظرفیت استفاده نشده و تعداد ترانسپوندرهای فعال را کاهش دهند [۱۵].

توان مصرفی هر روتر پورت و OXC و ترانسپوندر به ترتیب به صورت P_r و P_0 و P_t است؛ و در قسمت دیتاسنترها توان مصرفی دیتاسنتر مطابق شکل ۳، اگر دیتاسنتر فعال باشد به صورت P_{base}^b است و $\mu = P_{full} - P_{idle}$ که تفاوت استفاده از همه دیتاسنترها و حالت بیکاری دیتاسنترها است.



شکل ۳. توان مصرفی دیتاسنترها در مقابل بار مصرفی

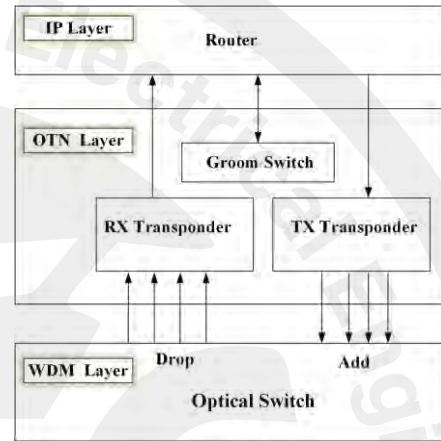
۲-۳- شبکه مجازی

درخواست r به صورت گراف $G^r = (N^r, E^r)$ نشان داده می شود که N^r مجموعه گره های مجازی و E^r مجموعه لینک های مجازی است و $N^{r,s}$ مجموعه همسایه گره s هست؛ و d, s اندیس گره های مبدأ و مقصد در توپولوژی یک VNR است. منابع محاسباتی درخواستی گره به صورت $c^{r,s}$ تعریف می شود $B^{r,s,d}$ پهنای باند درخواستی آن هست.

۳-۳- تعریف متغیرها

اگر دیتاسنتر گره m فعال باشد آنگاه $K_m = 1$ است و در غیر این صورت $K_m = 0$ است
اگر درخواست گره s از شبکه مجازی r ام، به طور کامل به شبکه بستر نگاشت شود آنگاه $\phi_m^{r,s} = 1$ در این صورت $\phi_m^{r,s} = 0$ است.
اگر نگاشت گره های مجازی s و d درخواست مجازی r به گره های بستر m و n با موفقیت انجام شود و اگر لینک های مجازی s, d وجود داشته باشند تا لینک b, e در بستر به وجود آیند آنگاه $\rho_{m,n}^{r,s,d} = 1$ است، در غیر درین صورت برابر با صفر است.
درخواست ترافیک بین جفت گره (m, n) در شبکه بستر که از تمام VNR های نگاشت شده جمع شده است
اگر دیتاسنتر گره m به هر گره مجازی درخواست r تخصیص یافته باشد برابر با یک است.
درخواست ترافیک s, d که به ترانسپوندر t ام و گره n اضافه می گردد.
درخواست ترافیک s, d که به ترانسپوندر t ام و گره n پیاده می گردد.
در صورتیکه ترافیک اضافه شده به ترانسپوندر فرستنده (n, t) ، در ترانسپوندر

IP، لایه OTN است و لایه نوری است. اضافه کردن لایه OTN، این امکان را ایجاد کرده است تا بتوان از تسهیم تقسیم زمانی و مدیریت سیگنال های نوری استفاده کرد و همچنین عملیات گرومینگ جهت استفاده بهینه از ظرفیت شبکه را ممکن ساخته است. نگاشت درخواست لینک VNR ها، نیازمند منابع هر سه لایه است.



شکل ۲. معماری شبکه فیزیکی سه لایه ای؛ IP-OTN-WDM

۳- تعریف مسئله

برای حل مسئله VNE، دو روش MILP و روش شهودی بیان شده است که با بهینه نگاشت کردن VNR ها موجب کاهش توان مصرفی می شود.

۱-۳- شبکه بستر

شبکه بستر به صورت یک گراف بدون وزن و بدون جهت $G=(N, E)$ مدل می شود شبکه که N و E نشانگر مجموعه های گره های شبکه ای نوری و لینک های فیبر نوری جهت دار هستند. فیبر نوری l در گره $B(l)$ آغاز شده و در گره $E(l)$ به پایان می رسد و دارای طول $L(l)$ است. m و n اندیس گره ها در توپولوژی فیزیکی (لایه نوری) در شبکه بستر است. هر گره دارای یک دیتاسنتر است که با منابع محاسباتی $Com(n)$ تعریف می شود. هر گره نوری یک روتر است که هر پورت روتر نرخ پهنای باند B_r دارد و حداکثر تعداد T جفت ترانسپوندر فرستنده و گیرنده در هر گره وجود دارد که با $T = \{1, \dots, T\}$ نشان داده می شوند و ترانسپوندرها نرخ بیت اطلاعاتی بیشینه به مقدار C و یک سویچ گرومینگ الکترونیکی دارد. ورودی/خروجی و یا جریان های ترافیکی اضافه شده/کم شده می توانند در سویچ گرومینگ ادغام شوند تا

گیرنده (n', t') پیاده نماید.

$X(n, t, l)$ مقدار آن در صورتی که لینک l در مسیریابی جریان ترافیک استفاده شود، ۱ و در غیر این صورت ۰ هست.

$$\sum_{r \in R} \sum_{s \in N^r} c^{r,s} \cdot \phi_m^{r,s} \leq Com(m) \quad m \in N \quad (4)$$

$$\sum_{m \in N} \phi_m^{r,s} = 1 \quad \forall r \in R, \forall s \in N^r \quad (5)$$

$$\sum_{r \in R} \sum_{s, d \in N^r: s \neq d} B^{r,s,d} \cdot \rho_{m,n}^{r,s,d} = R_{m,n} \quad \forall m, n \in N: n \neq m \quad (6)$$

$$K_b = \prod_{r \in R} \theta_m^r \quad (7)$$

۴-۲- محدودیت‌های لینک

معادله (۸) بیان می‌کند که برای هر درخواست اتصال s, d مجموع ترافیک جاری شده در گره n ، برابر با مجموع ترافیک خروجی از همان گره هست. معادله (۹) و (۱۰) ما را به ترتیب از پیاده کردن و اضافه کردن درخواست ترافیک در گره‌های مبدأ و مقصد خود، منع می‌نماید. قید معادله (۱۱) و (۱۲) اطلاعات نرخ بیت ترانسپوندرهای فرستنده و گیرنده کمتر از ظرفیت را در خود را نگهداری می‌کند. قید معادله (۱۳) و (۱۴) بیان می‌کند که تمامی بیت‌های ترافیکی ترانسپوندر فرستنده باید در ترانسپوندر گیرنده خود پیاده شود. و \mathcal{K} یک ثابت است که بر اساس ترافیک و توپولوژی شبکه مشخص می‌شود و مثبت و از یک کمتر است.

$$\sum_{t \in T} A d_{n,t}^{r,s,d} + \delta(n - e \phi_e^{r,s,d}) B^{r,s,d} = \sum_{t \in T} D r_{n,t}^{r,s,d} + \delta(n - \phi_m^{r,s}) B^{r,s,d}, \forall n, b, e \in N, \forall r \in R, \forall s \in N^r, \forall d \in N^{r,s} \quad (8)$$

$$\sum_{r \in R} \sum_{s \in N^r} \sum_{d \in N^{r,s}} \sum_{b \in N: b \phi_b^{r,s} = n, t \in T} D r_{n,t}^{r,s,d} = 0, \quad \forall n \in N \quad (9)$$

$$\sum_{r \in R} \sum_{s \in N^r} \sum_{d \in N^{r,s}} \sum_{e \in N: e \phi_e^{r,d} = n, t \in T} A d_{n,t}^{r,s,d} = 0, \quad \forall n \in N \quad (10)$$

$$\sum_{r \in R} \sum_{s \in N^r} \sum_{d \in N^{r,s}} A d_{n,t}^{r,s,d} \leq C, \quad \forall n \in N, \forall t \in T \quad (11)$$

$$\sum_{r \in R} \sum_{s \in N^r} \sum_{d \in N^{r,s}} D r_{n,t}^{r,s,d} \leq C, \quad \forall r \in R, \forall t \in T \quad (12)$$

۴-۳- تابع هدف

در تابع هدف قرار است توان مصرفی کلی که شامل توان مصرفی دیتاسنترها و شبکه است را حداقل کنیم. در معادله (۱) توان مصرفی کلی را نشان داده‌ایم و در معادله (۲) توان مصرفی شبکه نوری که شامل پورت روترها، ترانسپوندرها، تقویت‌کننده‌ها، سویچ گرومینگ، توان سویچ نوری است؛ که $G(n)$ توان مصرفی سویچ گرومینگ مطابق [۱۴] به ازای هر بیت سویچ شده مقدار G_{grm} مصرف می‌نماید. هر تقویت‌کننده نوری نیز به P_{amp} نیاز دارد؛ توان مصرفی کلی تقویت‌کننده بر روی یک لینک فعال $A(l)$ مطابق با [۱۴] محاسبه می‌شود. معادله (۳) توان مصرفی دیتاسنتر است که فقط توان سرورها در نظر گرفته شده است و فرض شده است که دیتاسنترهایی که استفاده نمی‌شود خاموش است:

$$\text{Minimize: } P_{total} = P_{net} + P_{dc} \quad (1)$$

$$P_{net} = \sum_{n \in N} \sum_{t \in T} \sum_{l \in E} P_t \cdot X_{(n,t,l)} + \sum_{n \in N} G(n) + \sum_{l \in E} A(l) + \sum_{m \in N} P_r \cdot Q_m + \sum_{m \in N} P_{Om} \quad (2)$$

$$P_{dc} = \sum_{m \in N} \sum_{r \in R} \sum_{s \in N^r} c^{r,s} \cdot \phi_m^{r,s} \cdot \mu + \sum_{m \in N} K_m \cdot P_{idle} \quad (3)$$

۴-۴- محدودیت‌های روش MILP

محدودیت‌های تابع هدف ذکر شده در بالا در دو بخش به صورت زیر ارائه شده است که از رابطه‌ی (۴) - (۷) برای نگاشت گره مجازی به گره شبکه بستر و از رابطه‌ی (۸) - (۲۳) برای نگاشت لینک است.

۴-۴-۱- محدودیت‌های جایگذاری گره مجازی

معادله (۴) تضمین می‌کند که درخواست‌های محاسباتی‌های تخصیص یافته به یک گره از ظرفیت دیتاسنترها تجاوز نکند. معادله (۵) تضمین می‌کند که هر گره در یک VNR تنها یک بار در شبکه فیزیکی نگاشت شود. معادله (۶) تضمین می‌کند که نودهای هر یک از VNR ها، به گره‌های متفاوت در شبکه فیزیکی نگاشت می‌شود معادله (۷) دیتاسنتر گره b اکتیو است اگر یک درخواست VN از آن استفاده کرده باشد و $\theta_m^r = \sum_{s \in N^r} \phi_m^{r,s}$ است.

$$\phi_m^{r,s} + \phi_n^{r,d} = \phi_m^{r,s} \oplus \phi_n^{r,d} + 2 \cdot \rho_{m,n}^{r,s,d} \quad (20)$$

$$\forall r \in R, \forall m, n \in N: m \neq n, \forall s \in N^r, \forall d \in N^{r,s}: s \neq d.$$

$$\rho_{m,n}^{r,s,d} = \rho_{m,n}^{r,d,s} \quad (21)$$

$$\forall r \in R, \forall m, n \in N: n \neq m \quad \forall s \in N^r, \forall d \in N^{r,s}: s \neq d$$

$$\sum_{m \in N} \sum_{n \in N: m \neq n} \sum_{s \in N^r} \sum_{d \in N^{r,s}: s \neq d} B^{r,s,d} \cdot \rho_{m,n}^{r,s,d}$$

$$= \sum_{s \in N^r} \sum_{d \in N^{r,s}: s \neq d} B^{r,s,d} \quad \forall r \in R \quad (22)$$

$$Q_n = \sum_{n \in N: m \neq n} R_{m,n} / B_t \quad \forall n \in N. \quad (23)$$

خطی سازی:

در معادله (7) از آنجایی که MIQCP است ما برای کاهش پیچیدگی از غیرخطی آن را خطی می‌کنیم با استفاده از یک ثابت مثبت بزرگ:

$$\frac{\sum_{r \in R} \theta_n^r}{\varepsilon} \leq K_n \leq \varepsilon \cdot \sum_{r \in R} \theta_n^r \quad (24)$$

۵- روش شهودی در نگاشت شبکه مجازی

در این روش گراف $G^r = (R^r, L^r)$ برای درخواست r تهیه می‌شود. گره r به گونه‌ای گروه‌بندی می‌شوند که گره‌هایی که به طور مستقیم در گراف G^r اتصال ندارند در یک گروه قرار گیرند. پس گروه‌های جدایی برای آن دسته از گره‌هایی که به طور مستقیم به هم وصل هستند ایجاد می‌شود تا از نگاشت این گره‌ها به یک گره در شبکه بستر جلوگیری شود. برای انجام گروه‌بندی مناسب از الگوریتم والش پاول^۱ [۱۶] استفاده شده است که باعث می‌شود تعداد گره‌های بستر کمتری را اشغال کند. برای سهولت در بررسی روش شهودی آن را به دو بخش نگاشت گره و نگاشت لینک تقسیم‌بندی کرده‌ایم. فلوجارت بخش نگاشت گره در شکل ۴ و فلوجارت بخش نگاشت لینک در شکل ۵ نشان داده شده است

۵-۱- نگاشت گره

مطابق با فلوجارت شکل ۵ گره‌های بستر بر اساس مقدار ظرفیت CPU در دسترس به صورت صعودی مرتب می‌شوند به عبارتی از کمترین ظرفیت در دسترس به بیشترین ظرفیت در دسترس. از آنجایی که پروفایل توان دیتاسنترها بهینه نیست پس روش

$$-\mathcal{K}(1 - n_{n',t}^{m,t}) \leq D_{n',t}^{r,s,d} - A_{n',t}^{r,s,d} \quad (13)$$

$$\forall n, n' \in N, \forall r \in R, \forall s \in N^r, \forall s \in N^{r,s}, \forall t, t' \in T$$

$$D_{n',t}^{r,s,d} - A_{n',t}^{r,s,d} \leq \mathcal{K}(1 - n_{n',t}^{m,t}), \quad (14)$$

$$\forall n, n' \in N, \forall r \in R, \forall s \in N^r, \forall s \in N^{r,s}, \forall t, t' \in T$$

معادله (۱۵) یک قید سویچینگ نوری است که بیان می‌دارد اگر یک ترافیک به یک گره برسد، یا باید در یک ترانسپوندر گیرنده پیاده کند و یا به گره مجاور سویچ شود. قید معادله (۱۶) جهت حذف حلقه در مسیرهای هدایت شده است. معادله (۱۷) اظهار می‌کند که اگر یک ترانسپوندر مسیر تخصیص یافته‌ای نداشته باشد، باید غیرفعال گردد. قید معادله (۱۸) می‌گوید اگر ترافیک به یک گره هدایت نشود، نمی‌تواند در آن گره پیاده یابد. در معادله (۱۹) بیانگر این است که اگر هیچ ترافیکی در یک ترانسپوندر گیرنده پیاده نشده باشد، آن ترانسپوندر باید غیرفعال گردد.

$$\sum_{l \in L: B(l)=n'} x_{(n,t,l)} = \sum_{l \in L: B(l)=n'} x_{(n,t,l)} + \sum_{t' \in T} n_{n',t'}^{m,t} \leq 1, \quad \forall n, n' \in V, \forall t \in T \quad (15)$$

$$\sum_{l \in L: B(l)=n} x_{(n,t,l)} = 0 \quad \forall n \in N, \forall t \in T \quad (16)$$

$$\sum_{r \in R} \sum_{s \in N^r} \sum_{d \in N^{r,s}} A_{n,t}^{r,s,d} \leq \mathcal{K} \sum_{l \in L: B(l)=n} x_{(v,t,l)}, \quad \forall n \in N, \forall t \in T \quad (17)$$

$$\sum_{t' \in T} n_{n',t'}^{m,t} \leq \mathcal{K} \sum_{l \in L: B(l)=n'} x_{(n,t,l)}, \quad \forall n, n' \in V, \forall t \in T \quad (18)$$

$$\sum_{r \in R} \sum_{s \in N^r} \sum_{d \in N^{r,s}} D_{n,t}^{r,s,d} \leq \mathcal{K} \sum_{n' \in N, t' \in T} n_{n',t'}^{m,t} \quad \forall n \in N, \forall t \in T \quad (19)$$

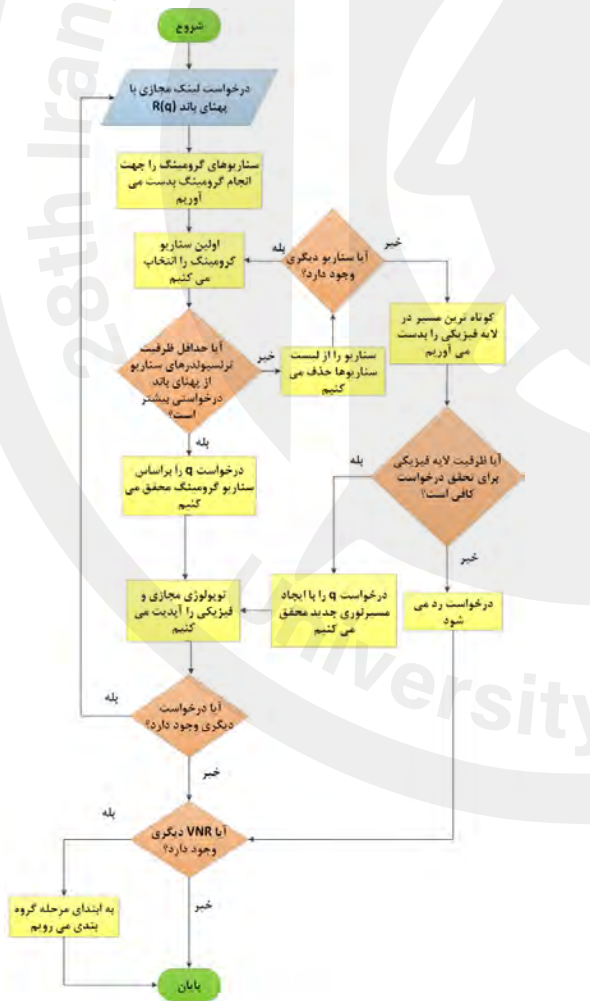
معادله (۲۰) تضمین می‌کند که گره‌های هر درخواست VNR که به هم متصل هستند در شبکه فیزیکی هم به هم متصل باشد. معادله (۲۱) تضمین می‌کند که یک درخواست که در شبکه فیزیکی نگاشت می‌شود دوطرفه است. معادله (۲۲) تضمین می‌کند که درخواست پهنای باند یک درخواست کاملاً جاسازی شده است. معادله (۲۳) تعداد پورت روتر در هر گره در شبکه فیزیکی را مشخص می‌کند.

^۱ Welsh-Powell

نگاشت گره‌ها به اتمام رسید به سراغ نگاشت لینک‌های مجازی به مسیره‌های نوری در شبکه بستر می‌پردازیم.

۲-۵- نگاشت لینک

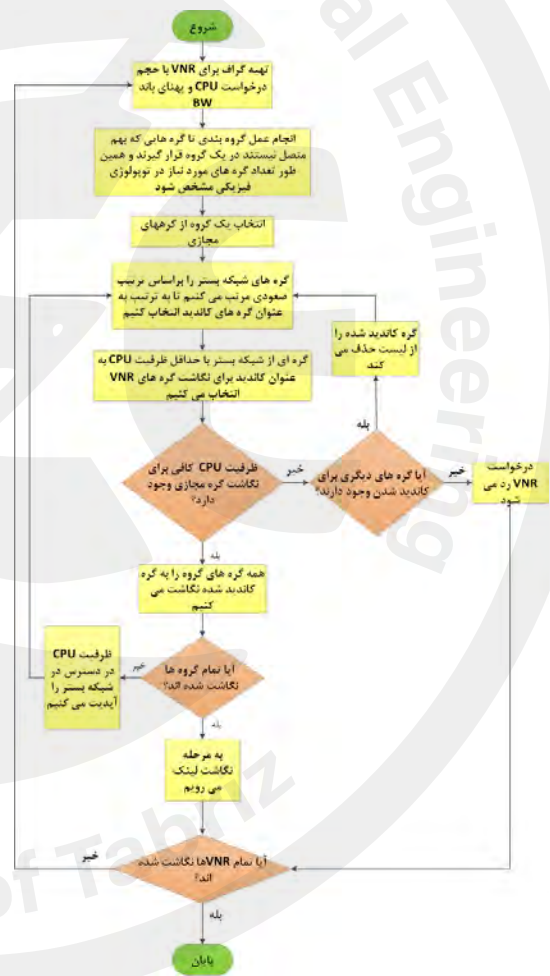
مطابق با فلوجارت شکل ۵ در این بخش به نگاشت لینک‌های مجازی به شبکه بستر پرداخته شده است تا بین گره‌های مجازی نگاشت شده در بخش قبل ارتباطی برقرار شود. به منظور بهینه استفاده از ظرفیت لینک‌ها و المان‌های فعال شبکه از جمله ترانسپوندرهای موجود در شبکه، الگوریتم گرومینگ به طور هم‌زمان با عمل نگاشت لینک انجام می‌شود تا بهره‌وری شبکه افزایش یابد. از طرفی گرومینگ تعداد ترانسپوندرها و تقویت‌کننده‌های بکار گرفته شده در شبکه را کاهش می‌دهد که به طور چشمگیری باعث کاهش توان مصرفی شبکه می‌شود. فرض کنید یکسری لینک‌های مجازی از قبل در شبکه نگاشت شده‌اند و مقدار از ظرفیت را اشغال کرده‌اند.



شکل ۵. فلوجارت مربوط به نگاشت لینک

حال درخواست جدیدی برای نگاشت لینک‌های مجازی مربوط به

شهودی در تلاش است تا ابتدا دیتاست‌نرهای با حداقل ظرفیت در دسترس را نگاشت کند؛ بنابراین، گره بستر با حداقل ظرفیت CPU را به عنوان اولین کاندید برای نگاشت اولین گروه انتخاب می‌شود. هرچند که گروهی را که نیاز به کمترین تعداد گره بستر را دارد انتخاب می‌کنیم اما ترتیب اینکه کدام گروه برای نگاشت انتخاب شود مهم نیست چراکه روی موفقیت یا شکست نگاشت گره‌ها تأثیری ندارد. اگر گره بستر کاندید شده دارای ظرفیت مناسب باشد آنگاه گره مجازی به آن گره بستر نگاشت خواهد شد در غیر این صورت روش شهودی تلاش می‌کند تا این گره مجازی را به گره بستر دیگری نگاشت کند.

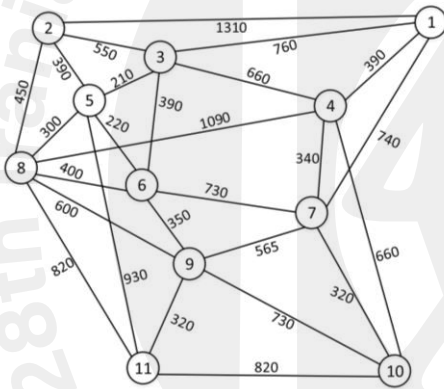


شکل ۴. فلوجارت مربوط به نگاشت گره

حال اگر تمام گره‌های بستر را به عنوان گره کاندید انتخاب کنیم اما ظرفیت به گونه‌ای باشد که نگاشت انجام نشود آنگاه VNR موردنظر رد شده و به تخصیص VNR دیگری می‌پردازیم. حال که

جدول ۱. مقادیر پارامترهای مسئله

مقدار	نماد	پارامترها
80	$L_{m,n}$	فاصله بین دو EDFA برحسب کیلومتر
16	T	حداکثر تعداد جفت ترانسپوندر در هر نود
100	C	ظرفیت ترانسپوندرها برحسب گیگاهیت بر ثانیه
1	P_r	توان مصرفی پورتروتر برحسب کیلو وات
0.073	P_t	توان مصرفی ترانسپوندر برحسب کیلو وات
0.016	P_e	توان مصرفی EDFA برحسب کیلووات
0.085	P_o	توان مصرفی سویچ نوری برحسب کیلووات
0.016	P_m	توان مصرفی مالتی پلکسر و دی مالتی پلکسر برحسب کیلووات
0.365	P_{full}	توان هر سرور در حالت بار کامل برحسب کیلووات
0.112	P_{idle}	توان هر سرور در حالت بی‌باری برحسب کیلووات
400×10^{-12}	ϵ_{grm}	توان مصرفی سویچ گرمینگ برحسب ژول بر بیت



شکل ۶. شبکه European Cost239

۱-۶- مقایسه الگوریتم و فرمولاسیون MILP

MILP را با استفاده از حل‌کننده ILOG CPLEX و الگوریتم را با استفاده از برنامه‌نویسی پایتون پیاده‌سازی می‌کنیم شبیه‌سازی‌ها در یک رایانه مجهز به پردازنده Core i7-472HQ و رم ۱۶ گیگابایتی اجرا گردیده‌اند. شکل ۷ مقایسه توان مصرفی برای MILP و الگوریتم‌های پیشنهادی است که نشان می‌دهد که اختلافی بین این دو نمودار است که برای توپولوژی European Cost239 حدود ۶ درصد است که این گپ بین حل بهینه و الگوریتم به دلیل کاهش فضای حل توسط الگوریتم هست.

گره‌های نگاشت شده مرحله قبل وارد می‌شوند. می‌توان این درخواست جدید را با درخواست‌های موجود در شبکه گروم کرد تا از ظرفیت خالی ترانسپوندرها به‌طور بهینه استفاده شود، در غیر این صورت برای هر درخواست جدید باید یک جفت ترانسپوندر اختصاص داده شود.

تعداد سناریوهای زیادی جهت گرومینگ وجود دارد. MATC^۹ (حداقل ظرفیت در دسترس ترانسپوندر) را می‌توان به‌صورت حداکثر حجم درخواستی که می‌تواند توسط سناریوهای گرومینگ ارسال شود تعریف کرد؛ بنابراین از بین تمام سناریوهای گرومینگ آن سناریو جهت گرومینگ با درخواست جدید انتخاب می‌شود که MATC مناسب را داشته باشد. با توجه به فلوچارت فرض کنید درخواست q با پهنای باند درخواستی $R_{(q)}$ از مبدأ $S_{(q)}$ به مقصد $D_{(q)}$ وارد شبکه می‌شود. با توجه به سناریوهای موجود بررسی می‌شود که آیا ظرفیت ترانسپوندرهای این سناریو (همان مقدار MATC) از MATC مناسب بود که عمل نگاشت درخواست مجازی به مسیر فیزیکی انجام می‌شود، در غیر این صورت به دنبال سناریوهای دیگری جهت انجام عمل گرومینگ و نگاشت درخواست انجام می‌شود؛ و اگر هیچ‌کدام از این سناریوها مناسب نبود آنگاه درخواست رد شده و به سراغ نگاشت یک VNR دیگری می‌رویم.

۶- شبیه‌سازی

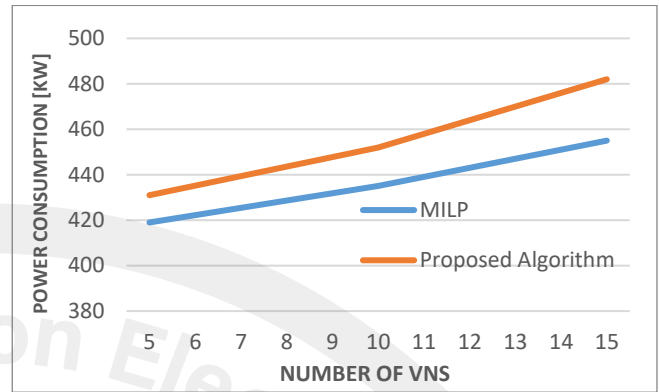
در این بخش از نتایج شبیه‌سازی جهت نمایش عملکرد فرمولاسیون‌ها و الگوریتم‌ها استفاده می‌کنیم. European Cost239 با توپولوژی شکل ۶ در نظر گرفته شده است؛ که در شکل عدد روی هر لینک نشان‌دهنده فاصله برحسب کیلومتر است. ظرفیت محاسباتی در هر گره با توزیع یکنواخت و بین بازه ۴۰۰ تا ۵۰۰ هست؛ و تعداد طول‌موج در هر لینک ۱۶ تا طول‌موج هست. درخواست شبکه‌های مجازی به‌صورت تصادفی تولید می‌شود بدین‌صورت که تعداد گره‌ها به‌صورت تصادفی و با توزیع یکنواخت بین بازه‌ی ۵ تا ۹ هست و با توزیع یکنواخت هر گره بین بازه ۱ تا ۳ درخواست سرور می‌کند و با احتمال ۰٫۵ بین دو گره لینکی وجود که پهنای باند با توزیع یکنواخت بین بازه ۱۰ تا ۴۰ گیگابیت بر ثانیه دارد. سایر پارامترها بر اساس مرجع [۱۲، ۱۴] مطابق جدول (۱) است.

^۹ Minimum Available Transponder Capacity

به دست آورد و نشان دادیم که استفاده از سویچ گرومینگ باعث کاهش توان مصرفی شبکه و توان کلی می‌شود.

مراجع

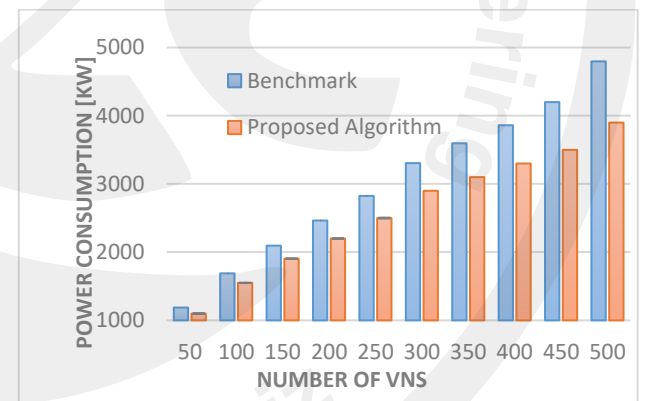
- [1] Jain, Raj, and Subharthi Paul. "Network virtualization and software defined networking for cloud computing: a survey." *IEEE Communications Magazine* 51, no. 11 (2013): 24-31.
- [2] Belbakkouche, Abdelouab, Md Mahmud Hasan, and Ahmed Karmouch. "Resource discovery and allocation in network virtualization." *IEEE Communications Surveys & Tutorials* 14, no. 4 (2012): 1114-1128.
- [3] Chowdhury, NM Mosharaf Kabir, Muntasir Raihan Rahman, and Raouf Boutaba. "Virtual network embedding with coordinated node and link mapping." In *IEEE INFOCOM 2009*, pp. 783-791. IEEE, 2009.
- [4] Hou, Weigang, Zhaolong Ning, Lei Guo, Zhikui Chen, and Mohammad S. Obaidat. "Novel framework of risk-aware virtual network embedding in optical data center networks." *IEEE Systems Journal* 12, no. 3 (2017): 2473-2482.
- [5] W. Hou, Z. Ning, and L. Guo, "Green survivable collaborative edge computing in smart cities," *IEEE Trans. Ind. Inf.*, vol. 14, no. 4, pp. 1594-1605, 2018.
- [6] Gringeri, Steven, Nabil Bitar, and Tiejun J. Xia. "Extending software defined network principles to include optical transport." *IEEE Communications Magazine* 51, no. 3 (2013): 32-40.
- [7] Van Heddeghem, Ward, Bart Lannoo, Didier Colle, Mario Pickavet, and Piet Demeester. "A quantitative survey of the power saving potential in IP-over-WDM backbone networks." *IEEE Communications Surveys & Tutorials* 18, no. 1 (2014): 706-731.
- [8] Idzikowski, Filip, Luca Chiaraviglio, Antonio Cianfrani, Jorge Lopez Vizcaino, Marco Polverini, and Yabin Ye. "A survey on energy-aware design and operation of core networks." *IEEE Communications Surveys & Tutorials* 18, no. 2 (2015): 1453-1499.
- [9] Dharmawera, M. Nishan, Rajendran Parthiban, and Y. Ahmet Şekercioglu. "Toward a power-efficient backbone network: The state of research." *IEEE Communications Surveys & Tutorials* 17, no. 1 (2014): 198-227.
- [10] Shehabi, Arman, Sarah Smith, Dale Sartor, Richard Brown, Magnus Herrlin, Jonathan Koomey, Eric Masanet, Nathaniel Horner, Inês Azevedo, and William Lintner. "United states data center energy usage report." (2016).
- [11] Dayarathna, Miyuru, Yonggang Wen, and Rui Fan. "Data center energy consumption modeling: A survey." *IEEE Communications Surveys & Tutorials* 18, no. 1 (2015): 732-794.
- [12] Nonde, Leonard, Taisir EH El-Gorashi, and Jaafar MH Elmighani. "Energy efficient virtual network embedding for cloud networks." *Journal of Lightwave Technology* 33, no. 9 (2014): 1828-1849.
- [13] Zong, Yue, Yanni Ou, Ali Hammad, Koteswararao Kondepu, Reza Nejabati, Dimitra Simeonidou, Yejun Liu, and Lei Guo. "Location-aware energy efficient virtual network embedding in software-defined optical data center networks." *IEEE/OSA Journal of Optical Communications and Networking* 10, no. 7 (2018): 58-70.
- [14] Hadi, Mohammad, and Mohammad Reza Pakravan. "Energy-efficient fast configuration of flexible transponders and grooming switches in OFDM-based elastic optical networks." *IEEE/OSA Journal of Optical Communications and Networking* 10, no. 2 (2018): 90-103.
- [15] Khodakarami, Hamid, Bipin Sankar Gopalakrishna Pillai, Behnam Sedighi, and William Shieh. "Flexible optical networks: An energy efficiency perspective." *Journal of Lightwave Technology* 32, no. 21 (2014): 3958-3969.
- [16] Stiebitz, Michael, Diego Scheide, Bjarne Toft, and Lene M. Favrholdt. *Graph edge coloring: Vizing's theorem and Goldberg's conjecture*. Vol. 75. John Wiley & Sons, 2012.



شکل ۷. مقایسه توان مصرفی دو روش MILP و روش شهودی بیان شده در توپولوژی European Cost239

۲-۶- بررسی عملکرد الگوریتم در مقیاس درخواست‌های زیاد

عملکرد الگوریتم پیشنهادی را با الگوریتم EEVNE که در مقاله [۱۲] ارائه شده است، مقایسه می‌کنیم. در شکل ۸ به مقایسه توان مصرفی کلی شبکه برای توپولوژی European Cost239 پرداخته می‌شود که الگوریتم پیشنهادی برای حالتی که ۵۰۰ درخواست مجازی داریم ۲۳ درصد توان مصرفی کاهش یافته است.



شکل ۸. مقایسه توان مصرفی الگوریتم پیشنهادی مقاله با الگوریتم EEVNE در توپولوژی European Cost239

۷- نتیجه‌گیری

در این مقاله به تخصیص منبع انرژی بهینه برای درخواست‌های مجازی در شبکه چندلایه IP-OTN-WDM پرداخته شد؛ که ما ابتدا با استفاده از MILP آن را فرمول‌بندی کردیم و در ادامه برای حل پیچیدگی مسئله و تهیه یک راه حل سریع و نزدیک بهینه، یک الگوریتم تخصیص منبع دومارحله‌ای ارائه داده‌ایم زیرا برای شبکه‌های بزرگ نمی‌تواند در یک بازه زمانی معقول، راه‌حل بهینه را