

Virtual Network Function Placement in 5G Core

۱. بررسی Literature موجود :

A. کلیات :

مساله ی قرار دادن عملکردهای مختلف از گذشته در شبکه ها وجود داشته و در واقع یکی از وظایف مهم شبکه به جز ایجاد اتصال بوده است. قبلا این کار با سخت افزارهای خاص منظوره ی گران قیمت انجام می شد، که با گسترش تکنولوژی های ساخت و مطرح شدن دیدگاه های جدید مدیریت شبکه، این مساله در حال تغییر است. مفاهیمی مانند Cloud و NFV در حال تغییر این سلطه هستند. مجازی سازی عملکردهای شبکه ، سخت افزارهای مختلف را به طور مجازی روی سیستم های عام منظوره اجرا می کنند، و می توانند هر عملکردی از شبکه را شامل شوند. یک مورد می تواند سرورهای Cache باشند که با نزدیکتر کردن محتوا به کاربر می تواند در QoS کاربر و بهبود وضعیت ترافیک لینک های Back-haul موثر باشند. چالش های سنتی موجود در این سرورها، مساله ی انتخاب جای پیاده سازی در شبکه و مساله مدیریت و تقسیم محتوا بین آنها بوده است. رویکردهای جدید چالش های جدیدی نیز به مساله می افزایند. یک Survey روی جایگیری این سرورها در شبکه ، مقاله ی [1] است. به دلیل همگرا نشدن تحقیقات به نقطه ای جامع و گسترده بودن بحث ، Survey خوبی روی فقط NFV پیدا نکردم. نمونه های ضعیفی مانند [2] وجود دارند. مقاله ی [1] مواردی را برای سرورهای Cache سنتی یعنی دیدگاه CDN بررسی می کند. سپس روی دو رویکرد جدید Cloud و NFV هم بررسی هایی انجام می دهد. موارد NFV آن و چند مقاله ی دیگر مفصل تر بررسی خواهند شد. ابتدا تعریفی کلی از صورت مساله ارائه می دهیم ، سپس توپولوژی های مورد استفاده را بررسی می کنیم. پس از توضیح این مقدمات ، قدری دقیقتر چند مقاله شامل موارد NFV در [1] بررسی می شوند. در انتها کار شبیه سازی انجام شده تشریح می شود.

B. اهداف ، تعریف مساله و حل :

مساله ی قرار گرفتن سرور در یک شبکه، عموماً با مساله ی بهینه سازی و معمولاً از نوع IP مدل می شود. در سناریوهایی خاص ، مثلاً عدم وجود تصمیم گیرنده ی مرکزی مدل های دیگری مانند Game Theory نیز استفاده شده است، همچنین در مواردی که متغیر تصمیم گیری ای به جز جای سرور وجود دارد مساله نیز بعدهای دیگری پیدا می کند که می تواند مساله را به مثلاً MILP تغییر دهد. برای بررسی مساله، اول باید سناریو مشخص باشد، زیرا انواع مختلف شبکه ها و کاربردهای مختلف تفاوتی را در ذات مساله ایجاد می کنند که نیاز به تعریف متفاوت مدل دارند. برای تعریف مساله چند قالب کلی معروف وجود دارد. مواردی ترکیبی یا خلاقانه دیگر نیز در مقالات دیده می شوند. چند مورد به این ترتیب اند:

- Facility Location : هدف تاسیس تعداد نامعلوم سرور برای رسیدن به هدف هایی روی کیفیت یا هزینه است.

- K-Median : هدف قرار دادن تعداد مشخصی سرور در شبکه است و باید بهترین حالت انتخاب شود.

- Minimum K-Center : هدف کمینه کردن هزینه ی کاربران است.

با توجه به تعریف های چارچوب کلی مساله ، دیده می شود که این اهداف را می توان با در نظر داشتن مسائل مختلف دنبال کرد. به همین منظور Objective های مختلفی در بهینه سازی تحت Constraint های مورد نظر تعریف می شوند. اکثر پارامترها را می توان با توجه به سناریو ، اولویت و تعریف مساله بین هدف یا محدودیت جا به جا کرد. مثلاً ممکن است هدف رسیدن به بهترین کیفیت باشد تحت هزینه ای مشخص یا برعکس ، رسیدن به بهترین قیمت تحت کیفیتی مشخص که خود نشان دهنده ی دید ما به مساله است. به عنوان مثال اگر سناریو تحت کنترل ISP یا اپراتور سلولی باشد هدف قرار دادن هزینه منطقی است ، ولی در سناریوهایی مانند Ad-Hoc ممکن است هدف رسیدن به با صرفه ترین قیمت نباشد. به طور کلی این اهداف می توانند از جنس هزینه باشند ، مثلاً هزینه ی تاسیس هر سرور جدید، هزینه ی نگهداری و کارکرد سرورها، هزینه ی انتقال محتوا از سرور ها به کاربر ها یا هزینه ی به روز رسانی محتوای موجود در سرورها توسط یک سرور مرکزی. ممکن است این اهداف QoS باشند که طبیعتاً معیارهای مختلفی می توان در نظر گرفت، مانند تعداد Hop ، تاخیر ، احتمال Packet Loss و برخی کارها که معمولاً سناریوهایی خاص تر دارند ، مسائلی مانند توزیع محتوا و انرژی را نیز در نظر می گیرند. اهمیت این مسائل در سناریوهایی مانند Data Center ها مشخص می شود.

برخی مقالات تنها به مساله ی جاگیری نمی پردازند. اگر به پاسخ خروجی مسائل جاگیری توجه شود می بینیم که بسیاری از این مسائل علاوه بر اطلاعات مکانی، الزامی هم روی مسیر داده ی مثلاً هر کاربر ایجاد می کنند، به این ترتیب، این مسائل معادل بررسی همزمان جاگیری و مسیریابی (Joint Placement-Routing) می شوند. مشابه همین مثال ، بسیاری از مقالات مفاهیمی از Scheduling را نیز در خروجی گزارش می کنند و در مساله آن را نیز در نظر می گیرند.

این موارد برای همه ی سرورهای Cache صادقند، ولی در موارد خاص NFV چالش های دیگری نیز مطرح می شوند. به طور کلی ظرفیت NFV را کمتر از سخت افزار خاص منظره در نظر می گیرند، هزینه ی راه اندازی و نگهداری آن را پایین تر قرار می دهند و نصب آن را دینامیک تر فرض می کنند. برخی کارها از مفهوم NFV فقط به عنوان یک سرور ارزانتر استفاده می کنند و در واقع تفاوتی با مسائل قدیمی نمی کنند، ولی موارد بهتر ، مسائل خاص NFV یعنی امکان مدیریت دینامیک تر جای سرور و همچنین امکان یا شاید ضرورت Chaining را هم بررسی می کنند. برخی نیز امکان وجود همزمان دو تکنولوژی NFV و CDN های قدیمی را بررسی می کنند و تعامل یا تاثیر این دو بر شبکه را آنالیز می کنند.

برای حل مرسوم ترین روش Exhaustive Search بود که اطمینان از Optimality حاصل شود. مواردی که نیاز به سرعت داشتند اکثراً پس از بررسی جستجوی کامل پیشنهاد روشی Heuristic داده بودند. برخی موارد ، به خصوص برای اندازه های خیلی بزرگ نیز از روش های Meta Heuristic و الگوریتم های بهینه سازی زیستی استفاده کرده بودند.

C. توپولوژی ها :

پس از تعریف مساله و هدف ، برای تحقق کامل سناریو باید بدانیم هدف Deployment چه شبکه ای است. سناریوهایی وجود دارند که مثلاً نیاز است امکان قطعی لینک در نظر گرفته شود ، یا برخی توپولوژی ها ذاتاً مناسب برخی سناریوها نیستند، مثلاً فرض توپولوژی Mesh ممکن است برای IP Back-Bone یا Core سلولی خوب باشد ، ولی فرضاً ممکن است برای RAN سلولی استفاده از Star مناسب تر باشد. این تفاوت ها می توانند منطقی بودن و بهینگی سناریوی پیشنهادی ما را تحت الشعاع قرار دهند به همین دلیل بهتر است با دقت بیشتری بررسی شوند.

در مقالات ، چند رویکرد مختلف مشاهده شد.

یک دسته از کارها که به بررسی تئوری نزدیکترند و هدفشان به عنوان مثال مدل کردن شبکه یا ارائه ی الگوریتم تجربی است، از توپولوژی های مشهور و تئوریک گراف استفاده ی زیادی کرده اند. مثلا از آنالیز سناریوی خود روی گراف کامل برای بهینه کردن الگوریتم های تجربی برای سناریوهای مختلف استفاده کرده اند.

یک دسته دیگر از گراف های مشهور مدل استفاده کرده بودند. این گراف ها برای انطباق با سناریوهایی خاص مانند شبکه های اجتماعی طراحی شده اند، نمونه هایی مشهور Barabasi-Albert و مدل Extended آن هستند.

دسته آخر نیز سناریوهای واقعی را بررسی کرده اند. چند مورد پرطرفدار شبکه ی CogentCo ، Internet2 (Abilene) ، شبکه ی IP Back-Bone آمریکا و شبکه ی Guifi هستند.

D. بررسی چند مورد :

در این بخش چند کار مرتبط بررسی شده اند. عناوین دقیق در بخش مراجع ذکر شده اند.

[3] : این کار توزیع محتوای تولید شده توسط کاربر ، مانند ویدئوی آپلود شده در YouTube را در سناریوی سرورهای Cloud اجاره ای بررسی می کند. مقاله به جز حل مساله ی بهینه سازی پیشنهادی ، مدلی نیز برای فاصله ی کاربر از محتوا توسعه می دهد. مساله ی پیشنهادی به این شکل است :

$$\min \quad f(\mathbf{n}) = c_{st} \mathbf{B}^T \mathbf{n} \mathbf{t} + c_{tr} \mathbf{B}^T \mathbf{H} \mathbf{R}$$

که در واقع هدف را مینیمم کردن مجموع هزینه ی انتقال محتوا تا کاربران و راه اندازی سرور قرار می دهد. محدودیت های مساله ، مسائل منطقی ساده مانند اطمینان از سرویس گرفتن همه و محدودیت های ظرفیت لینک و سرورند.

مقاله ابتدا مساله قرار دادن یک فایل در سرورها را بررسی می کند و آن را بر روی توپولوژی های مشهور تئوریک اعمال می کند. هدف مقاله از این کار به دست آوردن مدلی برای فاصله محتوا از کاربر با توجه به تعداد گره ی شبکه و تعداد سرور تاسیس شده است. این رابطه را به این صورت به دست می آورد :

$$H(n_k, \mathcal{G}(\Delta, N)) \approx C_1 \log_{\Delta} \frac{C_2 N}{n_k}.$$

که مشخص می کند با افزایش تعداد سرورهای دارنده ی محتوا ، فاصله متوسط با نرخ $\log(1/n)$ کاهش می یابد.

سپس مساله ی کامل را حل می کند. مدلی Heavy-Tail برای محبوبیت ویدئوهای مختلف در نظر می گیرد و ویدئوها را در سرورها ، و سرورها را در شبکه پخش می کند. این مساله را برای توپولوژی های واقعی حل می کند و در نهایت هم الگوریتمی تجربی برای حل سریع تر مساله پیشنهاد می کند.

[4] : هدف این مساله ، نصب عملکرد Transcoder برای تنظیم نرخ ویدئو بوده است. با توجه به سناریو حالت SFC (Chain) ساده ی استفاده شده مشخص می شود، یعنی باید از سرور مرکزی به NFV ها یک ارتباط داشته باشیم و سپس از NFV ها به کاربران. حالتی ممکن این زنجیره NFV مثال زده می شود و رابطه ی جای سرورهای دارنده محتوا و سرورهای

اجرا کننده ی مجازی Transcoder بررسی می شوند. حالتی برای بهینگی پهنای باند و حالتی برای بهینگی ظرفیت حافظه ی نگهداری مناسبتر هستند.

مقاله در ادامه نمونه ای از هزینه های واقعی CAPEX و OPEX سرورها را مثال می زند تا اهمیت تغییرپذیری سایز NFV را توجیه کند. به این ترتیب مقاله به جز مکان این NFV ها، بر روی اندازه ی آن ها نیز جستجو می کند. مساله ی نهایی به شکل زیر می شود:

$$\min \sum_{n \in \mathcal{N}} D_n \times TCO(V_n, S_n) + \sum_{l \in \mathcal{L}} T_l \times Cost(l)$$

برای حل آن نیز از الگوریتم تکاملی زیستی ژنتیک استفاده می شود.

[5]: این مقاله سناریوی به خصوصی از لحاظ خدمات را در نظر نمی گیرد، بلکه جاگیری خود VNF ها را بررسی می کند، یعنی بدون توجه به کارکرد خاص، سخت افزار مجازی را مدیریت می کند. به همین خاطر وقت بیشتری روی بررسی دقیقتر هدف و محدودیت ها و حل می گذارد تا بررسی نتایج و معنای آن در سناریوهای واقعی. این مساله را در دو بخش مدل می کند، یکی جاگیری تجهیزات مجازی سازی و دیگری تقسیم وظایف داخل دستگاه ها. مقاله اجازه ی تقسیم وظایف بین دستگاه های مختلف را نمی دهد یعنی Chain ندارد. مساله ی دوم که نوآوری واقعی مقاله است، به نام مساله ی GAP یا مساله ی تخصیص کلی شناخته می شود و هدفش دادن n کار به l دستگاه است. در دو مساله ی بهینه سازی پیشنهادی مقاله برای مساله ی Facility location طبق رابطه ی زیر (مینیم کردن هزینه سرور و هزینه انتقال محتوا) داریم:

$$\text{Min} \quad \sum_{c \in C} \sum_{i \in f(c)} \sum_{u \in U} x_{cu}^i \cdot d(c, u) + \sum_{u \in U} \sum_{i=1}^m y_u^i \cdot p_u^i$$

و برای مساله ی Generalized Assignment Problem داریم:

$$\text{Min} \quad \sum_{m=1}^{\ell} \sum_{j=1}^n \lambda_{mj} p_{mj}$$

هیچ کدام از مسائل محدودیت جدیدی ندارند و محدودیت های معمول روی ظرفیت و اطمینان از پوشش سراسری را شامل می شوند. مقاله پس از حل جداگانه ی هر یک از دو مساله و معرفی الگوریتم هایی برای حل آنها، از مفاهیم به دست آمده استفاده می کند تا مساله ی کامل را حل کند. مقاله دو حالت در نظر می گیرد، یکی این که هر سرور بتواند به بیشمار کاربر سرویس دهد، و دیگری این که ظرفیت هر سرور محدود باشد. سپس برای این دو مساله Heuristic ارائه می دهد. تمرکز اصلی مقاله روی روند گسترش این حل های تجربی است، که هر کدام نیاز به تعاریفی در نظریه ی گراف دارند. در انتها نیز مقایسه ای از عملکرد روش های تجربی ارائه می شود.

[6]: این مقاله حالت ساده ولی کاملی را از NFV Chaining بررسی می کند. این کار عملکرد VNF خاصی را در نظر نمی گیرد و فرض می گیرد که زنجیره سرویس می تواند از خدمات مختلفی مانند NAT، transcoder، firewall و ... تشکیل شده باشد. مساله ی پیشنهادی مقاله جاگیری این VNF ها و مسیر رسیدن هر یک به کاربر را مورد بررسی قرار می دهد. مساله ی بهینه سازی طراحی شده به این شکل ارائه می شود:

$$\text{Minimize : } \sum_{(s,d) \in \Psi_{s,d}} \sum_{p \in K_{s,d}} r_p^{(s,d)} \times I_{s,d}^p \times \Phi_{s,d}$$

محدودیت هایی که مساله تعیین می کند مانند قبل محدودیتهای پیچیده ای نیستند، ظرفیت لینک و تجهیزات ، اطمینان از پوشش تمامی مبدا و مقصدها و بررسی صحت تعداد و ترتیب VNF ها. مقاله حالت Draft دارد ، یعنی هنوز حتی به مرحله ی حل این مساله هم نرسیده است، ولی خروجی مورد انتظار مجموعه ای از مکان قرارگیری سرور VNF و مسیری برای هر کاربر به صورت انتها به انتها است. به این ترتیب این کار همزمان مسیریابی را نیز هدف قرار می دهد.

[7] : سناریوی مد نظر این کار SDvCDN است. یعنی شبکه ی توزیع محتوای مجازی تحت مدیریت مرکزی را بررسی می کند. با این که سناریوی تکراری ای دارد، ولی در عوض مساله را بسیار کامل مدل می کند. ابتدا معماری مورد بررسی توضیح داده می شود که شامل اجزای معمول مجازی و Orchestrator است . با توجه به سناریوی بیان شده، باید تعدادی سرور CDN مجازی از یک سرور مرکزی نگهدارنده ی محتوا داده را دریافت و به کاربران تحویل دهند. مساله ی بهینه سازی بررسی شده به این شکل است:

$$\underset{f,y}{\text{minimize}} \quad \sum_{i \in \mathcal{V}} \left(e_i f_i + \sum_{k \in \mathcal{K}_i} a_{i,k} y_{i,k} \right) + \sum_{(i,j) \in \mathcal{E}} \left(e_{ij} f_{ij} + \sum_{k \in \mathcal{K}_{ij}} a_{ij,k} y_{ij,k} \right)$$

محدودیت هایی که در نظر گرفته می شوند، برخی خاص این مساله هستند و در مسائل قبل وجود نداشتند. محدودیت پوشش کامل و ظرفیت لینک ها و تجهیزات و محدودیت تاخیر انتقال که اینجا با Hop Count مدل شده قبلا وجود داشتند. امکان ارسال همکارانه داده باعث پیوسته شدن متغیر تصمیم گیری ذخیره ی محتوا می شود ولی قرار گرفتن یا نگرفتن سرور در نقطه ای از شبکه هنوز باینری است، به این ترتیب مساله فرم MILP به خود می گیرد. همچنین با وجود uni-cast بودن انتقال از vCDN به کاربران ، مساله برای توزیع محتوا از سرور مرکزی به vCDN ها اجازه ی ترافیک Multi-cast می دهد که در محدودیت متناظر اعمال می شود.

فرض هایی مانند درخت بودن توپولوژی اضافه می شود که باعث ساده تر شدن مساله و حل در زمان Polynomial می شود.

برای شبیه سازی توپولوژی مورد بررسی شبکه ی Abilene است. نتایج شبیه سازی ارائه می شوند.

[8] : مساله با اشاره به اندازه بزرگ شبکه های توزیع محتوای فعلی با مثال زدن شبکه ی akamai ، نیاز به vCDN را بیان می کند. مساله وجود همزمان ادوات فیزیکی و مجازی را بررسی می کند. به علاوه مدلی احتمالی از ترافیک و تغییرات آن در آینده را به مساله می افزاید. تعریف صورت مساله به این صورت انجام می شود :

$$\min \sum_{s \in \mathcal{SP}} \left[C_s^P a_s \right] + \mathbb{E}_{\Phi} \left[\sum_{s \in \mathcal{SV}} \sum_{t \in \mathcal{T}} \sum_{d \in \mathcal{D}} (C_s^V z_{s,d}^{t,\phi}) \right]$$

همان طور که دیده می شود، مساله مجموع هزینه ی سرورهای فیزیکی و میانگین هزینه ی سرورهای مجازی را برای ترافیک های تصادفی کمینه می کند. به جز محدودیت های معمول، مساله شرطی بر روی تاخیر هم تعیین می کند.

یک حل Heuristic نیز ارائه می شود.

برای شبیه سازی ، این کار از مدل توپولوژی barabasi-albert استفاده می کند و برای تنظیم مقادیر ثابت مساله هم از اطلاعات واقعی تجهیزات و خدمات شبکه استفاده می شود.

II. کار انجام شده :

هدف شبیه سازی یکی از مقالات نبود، بلکه در نظر داشتیم Contribution ای هم به کارهای موجود بکنم. سه بهبود در نظر داشتیم که به خاطر کمبود وقت فقط یکی آماده شد.

بهبودی که انجام شد ، دخیل کردن Reliability دستگاه ها در مساله بود. پس از بررسی چند مقاله دیگر ، کاری پیدا نکردم که برای NFV این مساله را انجام داده باشد. کارهایی نزدیکی در CDN های قدیمی وجود داشت که با توجه به تغییر دلیل و تغییراتی در جزئیات تفاوتی نیز پیش می آید. نزدیکترین کار ، برای Datacenter ها بود که احتمال وقوع حادثه ی طبیعی را دیده بود [9] . در واقع می توان این مساله را معادل ضریب اطمینان در NFV دید ولی تفاوت هایی نیز وجود دارد. مثلاً من در شبیه سازی خود در نظر گرفتم که جایگشت های مختلفی از حالت خطا وجود داشته باشد در صورتی که برای حادثه طبیعی ، فرض رخداد همزمان بین دو نقطه در سطح مثلاً یک کشور غیر منطقی است. به جز این مساله، تعریف مساله ی من نیز با کار قبلی تفاوت دارد.

مساله را در سناریویی مانند اپراتور سلولی دیدم. بنابراین می توان فرض کرد با توجه به تعداد تجهیزات سخت افزاری موجود، و تعداد کاربران ، اپراتور قصد بروزرسانی دارد. بنابراین منطقی خواهد بود که تعداد مشخصی NFV پیاده سازی کنیم، یعنی مساله را K-Median در نظر گرفتیم. در واقع می توان مساله ی هدف را به این شکل تعریف کرد (احتمالاً غلط) :

$$\min \sum_{\text{Comb.}} \left(P_{\text{com}} \cdot \alpha \sum_{\text{Target}} \left(\text{Shortest Path} \sum_{\text{Link}} \text{weights} \right) \right)$$

وزن ها را می توان به معانی مختلف تاخیر یا پهنای باند یا ... تفسیر کرد. α بردار تصمیم گیری ، یعنی نشان دهنده ی گره های انتخاب شده ی شبکه برای راه اندازی تعداد مشخص سرور است. Combination ها جایگشت های مختلف خرابی سرورها و احتمال معادل هر یک هستند. Target و Link ها هم هر یک گره ی هدف برای خدمات رسانی و لینک های روی کوتاه ترین مسیر هستند.

محدودیت های معمول در مساله معتبر هستند.

برای شبیه سازی از NetworkX استفاده شد. برای توپولوژی از گراف تصادفی موجود در کتابخانه استفاده شد. مدل های دیگر مانند Barabasi-Albert هم به طور پیش فرض در کتابخانه وجود دارند.

نتایج مشاهده شده :

- تاثیر واضحی از تغییر اندازه و درجه ی گراف بر روی نتایج ندیدم. ممکن است شبیه سازی های بیشتر با تغییرات بیشتر روی این مساله نتیجه ای متفاوت نشان دهد.

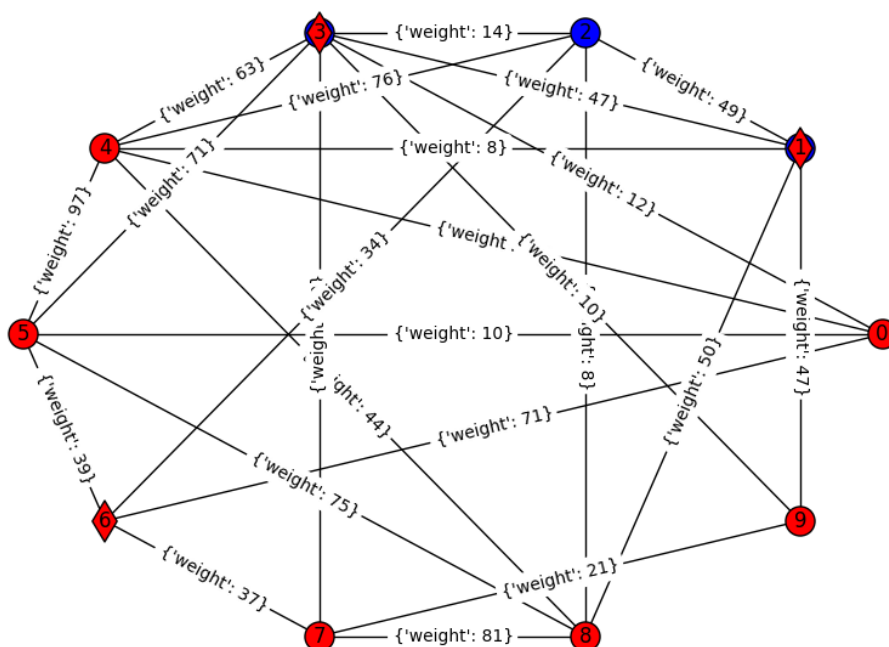
- افزایش احتمال خطای سرورها باعث می شود تا شبکه خود را برای حالت های بدتر آماده کند و در واقع از حالت معمول جاگیری سرورها فاصله بگیرد.

- افزایش وزن ها باعث می شد که حتی خرابی کوچکی تاثیر منفی بیشتری داشته باشد ، در نتیجه شبکه برای حالت بد تطبیق پیدا کند.

نمونه ای از اجرای برنامه در شکل زیر نشان داده می شود :

```
{**ALL DISTANCES MINS LIST - Len :**, 1, '& all sets', [[36, 124.72312499999998]]}
{**NO BROKE MINS LIST - Len :**, 2, '& all sets', [[45, 92.59649999999998], [86, 92.59649999999998]]}
```

یعنی در صورت Reliability برابر صد در صد برای سرورها ، دو جایگشت ۴۵ و ۸۶ هر دو بهترین حالت قرار گیری سرور با توجه به هزینه ها هستند. ولی در صورت احتمال خرابی ۵ درصد ، فقط حالت ۳۶ جواب خواهد بود. این مساله روی شبکه به شکل زیر است، لوزی ها جواب بدون خرابی ، و رنگ های آبی جواب در صورت احتمال بروز خطا هستند.



دیده می شود که در صورت ضریب اطمینان کامل ، گره های ۱ ، ۳ و ۶ باید به عنوان مکان سرور انتخاب شوند، ولی در صورت خرابی ، گره های ۱ ، ۳ و ۲ جواب خواهند بود.

دو بهبود دیگر که فرصت شبیه سازی نشد :

دیدن همزمان ترافیک S2C و E2E . کارهای موجود تنها یکی از این دو حالت را در نظر گرفته بودند در صورتی که در شبکه های امروزی هر دو نوع جریان ترافیک متداول است. (Server-Client یا End2End)

بارگذاری روی شبکه، یعنی به جای تنظیم وزن و محدودیت روی لینک ها مانند کارهای انجام شده، با عبور هر جریان بیشتر از هر لینک ، وزن آن (مثلا تاخیر) به صورت نمایی افزایش یابد. (این مورد تا نیمه شبیه سازی شده است)

منابع ارجاع شده :

- [1] Sahoo, J., Salahuddin, M., Glitho, R., Elbiaze, H. and Ajib, W. , "A Survey on Replica Server Placement Algorithms for Content Delivery Networks", *IEEE Communications Surveys & Tutorials*, 19(2), 2017, pp.1002-1026.
- [2] Xin Li and Chen Qian, "A survey of network function placement," *2016 13th IEEE Annual Consumer Communications & Networking Conference (CCNC)*, Las Vegas, NV, 2016, pp. 948-953.
- [3] Y. Jin, Y. Wen and K. Guan, "Toward Cost-Efficient Content Placement in Media Cloud: Modeling and Analysis", *IEEE Transactions on Multimedia*, vol. 18, no. 5, 2016, pp. 807-819.
- [4] N. Bouten *et al.*, "Towards NFV-based multimedia delivery," *2015 IFIP/IEEE International Symposium on Integrated Network Management (IM)*, Ottawa, ON, 2015, pp. 738-741.
- [5] R. Cohen, L. Lewin-Eytan, J. S. Naor and D. Raz, "Near optimal placement of virtual network functions," *2015 IEEE Conference on Computer Communications (INFOCOM)*, Kowloon, 2015, pp. 1346-1354.
- [6] A. Gupta, M. F. Habib, P. Chowdhury, M. Tornatore and B. Mukherjee, "Joint Virtual Network Function Placement and Routing of Traffic in Operator Networks," UC Davis Technical Report, 2015.
- [7] J. Llorca, C. Sterle, A. M. Tulino, N. Choi, A. Sforza and A. E. Amideo, "Joint content-resource allocation in software defined virtual CDNs," *2015 IEEE International Conference on Communication Workshop (ICCW)*, London, 2015, pp. 1839-1844.
- [8] M. Mangili, F. Martignon and A. Capone, "Stochastic Planning for Content Delivery: Unveiling the Benefits of Network Functions Virtualization," *2014 IEEE 22nd International Conference on Network Protocols*, Raleigh, NC, 2014, pp. 344-349.
- [9] S. Ferdousi, F. Dikbiyik, M. F. Habib, M. Tornatore and B. Mukherjee, "Disaster-aware datacenter placement and dynamic content management in cloud networks," in *IEEE/OSA Journal of Optical Communications and Networking*, vol. 7, no. 7, pp. 681-694, July 2015.