



دانشگاه صنعتی امیرکبیر

(پلی تکنیک تهران)

دانشکده مهندسی کامپیوتر و فناوری اطلاعات

پروژه کارشناسی ارشد

شبکه‌های کامپیوتری

زنجیره‌سازی کارکردهای مجازی سرویس شبکه با لحاظ محدودیت
منابع مدیریتی

نگارش

پرهام الوانی

استاد راهنما

دکتر بهادر بخشی

شهریور ۱۳۹۸

بِسْمِ اللَّهِ الرَّحْمَنِ الرَّحِيمِ

این پایان نامه را به تمام دوستانم که امروز در کنارم نیستند تقدیم می‌کنم.

سپاس‌گزاری

در اینجا لازم می‌دانم از راهنمایی‌ها و مساعدت‌های اساتید عزیز و گرانقدرم جناب آقای دکتر بخشی صمیمانه قدردانی و سپاس‌گزاری نمایم. در ادامه از دوست خوبم بهروز فرکیانی که همواره من را راهنمایی کرده‌اند تشکر می‌کنم. در آخر از پدر و مادرم که همواره من را حمایت کرده‌اند تشکر می‌کنم.

پرهم الوانی
شهریور ۱۳۹۸

چکیده

مسئله‌ی مجازی سازی توابع شبکه سعی دارد توابع شبکه را به صورت مجازی در شبکه جایگذاری نمایند و در ادامه با برقراری ارتباط میان آن‌ها سرویس‌هایی را فراهم آورد. یکی از مسائل در این روش پذیرش سرویس‌ها و قرار دادن آن‌ها بر روی زیرساخت است که در کارهایی زیادی به آن پرداخته شده است ولی یکی از اجزا معماری مجازی سازی کارکردهای شبکه بخش مدیریتی است که می‌بایست در کنار سرویس‌ها بر روی زیرساخت مستقر شود. در این رساله ما قصد داریم جایگذاری سرویس‌ها با لحاظ منابع مدیریتی را مدل‌سازی و حل نماییم.

واژه‌های کلیدی:

مجازی سازی کارکردهای شبکه، زنجیره‌سازی کارکردهای مجازی سرویس شبکه، بهینه‌سازی، بهینه‌سازی خطی صحیح

فهرست مطالب

صفحه	عنوان
۱	۱ مقدمه
۲	۱-۱ تعریف صورت مساله
۳	۲-۱ اهمیت مساله
۳	۳-۱ نوآوری
۳	۴-۱ ساختار گزارش
۴	۲ مفاهیم پایه
۵	۱-۲ مقدمه
۵	۲-۲ مجازی سازی کارکرد شبکه
۶	۳-۲ معماری NFV
۷	۴-۲ زیرساخت مجازی سازی کارکردهای شبکه
۸	۵-۲ کارکردهای مجازی شبکه
۸	۶-۲ EM
۸	۷-۲ OSS/BSS
۸	۸-۲ NFV MANO
۹	۳ کارهای مرتبط
۱۲	۴ تعریف مساله
۱۳	۱-۴ مساله
۱۴	۲-۴ فرمول بندی
۱۷	۵ راه حل پیشنهادی
۱۸	۱-۵ الگوریتم مکاشفه ای
۱۹	۶ ارزیابی
۲۱	منابع و مراجع

فهرست اشکال

صفحه

شکل

۱-۲ معماری مجازی سازی کارکردهای شبکه ۷

فهرست جداول

صفحه

جدول

۱۱ ۱-۳ مقایسه مقالات پذیرش زنجیره‌های کارکرد سرویس
----	---

فصل اول

مقدمه

راه اندازی و استقرار سرویس در صنعت مخابرات به طور سنتی بر این اساس است که اپراتورهای شبکه سخت افزارهای اختصاصی فیزیکی و تجهیزات لازم برای هر کارکرد در سرویس را در زیرساخت خود مستقر کنند. فراهم کردن نیازمندی هایی مانند پایداری و کیفیت بالا منجر به اتکای فراهم کنندگان سرویس بر سخت افزارهای اختصاصی می شود. این درحالی است که نیازمندی کاربران به سرویس های متنوع و عموماً با عمر کوتاه و نرخ بالای ترافیک افزایش یافته است. بنابراین فراهم کنندگان سرویس های باید مرتباً و به صورت پیوسته تجهیزات فیزیکی جدید را خریده، انبارداری کرده و مستقر کنند. تمام این عملیات باعث افزایش هزینه های فراهم کنندگان سرویس می شود. با افزایش تجهیزات، پیدا کردن فضای فیزیکی برای استقرار تجهیزات جدید به مرور دشوارتر می شود. علاوه بر این باید افزایش هزینه و تاخیر ناشی از آموزش کارکنان برای کار با تجهیزات جدید را نیز در نظر گرفت. بدتر این که هر چه نوآوری سرویسها و فناوری شتاب بیشتری بگیرد، چرخه عمر سخت افزارها کوتاهتر میشود که مانع از ایجاد نوآوری در سرویس های شبکه می شود.

در سال های اخیر دو تکنولوژی شبکه های نرم افزارمحور و مجازی سازی شبکه بسیار مورد توجه قرار گرفته اند. پیشتر در ارائه سرویس های شبکه، از سخت افزارهای اختصاصی که توسط سازندگان اختصاصی ارائه می شد و به آن ها middle box گفته می شد استفاده می گشت. تنوع و تعداد رو به افزایش سرویس های جدیدی که توسط کاربران تقاضا می گردد باعث هزینه های زیاد برای خرید و نگهداری middle boxها توسط اپراتورها شده است. به تازگی فراهم آورندگان شبکه شروع به حرکت به سوی مجازی سازی و نرم افزاری کردن بسترهای شبکه کرده اند، به این ترتیب آن ها قادر خواهند بود سرویس های نوآورانه ای به کاربران ارائه بدهند. این روند به سرویس دهندگان اجازه می دهد که ارائه سرویس های دلخواه شان وابسته به سخت افزارهای اختصاصی نباشد و هزینه های راه اندازی و نگهداری فراهم آوردندگان سرویس را کاهش می دهد. با نرم افزاری سازی کارکردها، وابستگی آن ها به سخت افزار اختصاصی کاهش یافته و به سرعت می توان آن ها را افزایش/کاهش مقیاس داد. مجازی سازی کارکردهای شبکه و زنجیره سازی کارکرد سرویس راهکاری هایی هستند که برای همین منظور پیشنهاد شده اند.

ایده ی اصلی مجازی سازی توابع شبکه جداسازی تجهیزات فیزیکی شبکه از کارکردهایی می باشد که بر روی آن ها اجرا می شوند. به این معنی که یک کارکرد شبکه مانند دیوار آتش می تواند بر روی سرورهای HVS¹ به عنوان یک نرم افزار ساده مستقر شود. با این روش یک سرویس می تواند با استفاده از کارکردهای مجازی شبکه ای که می توانند به صورت نرم افزاری پیاده سازی شده و روی یک یا تعدادی سرور استاندارد فیزیکی اجرا شوند، استقرار یابد. کارکردهای مجازی شبکه ای می توانند در مکان های مختلف بازماندنی یا نمونه سازی شوند بدون آنکه نیاز به خریداری و نصب تجهیز جدیدی باشد. [۱۱]

۱-۱ تعریف صورت مساله

مساله ی جاسازی کارکردهای مجازی شبکه یکی از چالش های مهم در تخصیص منابع به زنجیره های کارکرد سرویس می باشد. مساله جاسازی کارکردهای مجازی شبکه به دو زیر مساله ی نگاشت گره های مجازی و نگاشت یال های تقسیم می شود که می بایست به صورت توأمان در نظر گرفته شوند.

البته محدودیت های زیادی وجود دارد که باید هنگام نگاشت در نظر گرفته شود. منابع فیزیکی انتخاب شده از شبکه زیرساخت باید نیازمندی های کارکرد شبکه مجازی را تامین کنند به عنوان مثال قدرت پردازشی کارکردهای مجازی باید کمتر یا مساوی با قدرت پردازشی گره فیزیکی باشد که نگاشت روی آن انجام شده است.

علاوه بر این، مجموعه ای از محدودیت ها وجود دارد که مختص زنجیره های کارکرد سرویس می باشد. یکی از این موارد وجود VNFM در این شبکه های می باشد که به علت اهمیت میزان تاخیر ارتباط بین کارکرد مجازی شبکه و VNFM می بایست در مکان مناسبی جایابی شود بنابراین زیرمساله ی جدیدی به مساله ی اصلی اضافه می شود.

¹ High Volume Server

۲-۱ اهمیت مساله

مساله‌ی جاسازی زنجیره‌های کارکرد سرویس از اهمیت زیادی برخوردار است و پژوهش‌های زیادی بر روی آن صورت پذیرفته است. در کنار این جاسازی مساله مدیریت و مانیتورینگ این زنجیره‌ها نیز مطرح است که این پروژه برای اولین بار این موضوع را نیز مدنظر قرار داده است که باعث می‌شود اهمیت مساله دو چندان شود.

۳-۱ نوآوری

ایده‌ی اصلی این پژوهش، ارائه‌ی یک راه‌حل جامع و کامل که تمامی ابعاد مساله‌ی جاسازی زنجیره‌های کارکرد سرویس را در برگیرد، است. در واقع در این مساله علاوه بر در نظر گرفتن ابعاد اصلی مساله‌ی جاسازی مکانیزم کنترل پذیرش، قابل اعمال بودن راه‌حل به توپولوژی‌های مختلف و وجود محدودیت‌های گره و یال ابعاد دیگری نیز در نظر گرفته شده است. به علت وجود VNFM به عنوان یک گره خاص و اهمیت تاخیر اتصالات کارکرد مجازی شبکه و VNFM یک مرحله جایابی و نگاشت به مساله‌ی اصلی اضافه شده است. در ادامه محدودیت‌هایی برای اتصالات بین کارکرهای مجازی شبکه و VNFM‌ها در نظر گرفته شده است و فرض شده است برای مدیریت تعداد مشخصی از کارکرهای مجازی نیاز به تهیه مجوز با هزینه‌ای مشخص است.

۴-۱ ساختار گزارش

در ادامه معماری NFV را معرفی می‌کنیم و به چالش‌هایی که در MANO وجود دارد می‌پردازیم. در فصل سوم کارهای مرتبط مرور می‌شوند و در فصل چهارم مساله تعریف شده بیان می‌گردد. در فصل پنجم در مورد راه‌حل پیشنهادی برای مساله بحث خواهد شد. در آخر در فصل ششم راه‌حل پیشنهادی ارزیابی می‌گردد.

فصل دوم

مفاهیم پایه

۱-۲ مقدمه

راه اندازی و استقرار سرویس در صنعت مخابرات به طور سنتی بر این اساس است که اپراتورهای شبکه سخت افزارهای اختصاصی فیزیکی و تجهیزات لازم برای هر کارکرد در سرویس را در زیرساخت خود مستقر کنند. فراهم کردن نیازمندی هایی مانند پایداری و کیفیت بالا منجر به اتکای فراهم کنندگان سرویس بر سخت افزارهای اختصاصی می شود. این درحالی است که نیازمندی کاربران به سرویس های متنوع و عموماً با عمر کوتاه و نرخ بالای ترافیک افزایش یافته است. بنابراین فراهم کنندگان سرویس های باید مرتباً و به صورت پیوسته تجهیزات فیزیکی جدید را خریده، انبارداری کرده و مستقر کنند. تمام این عملیات باعث افزایش هزینه های فراهم کنندگان سرویس می شود. با افزایش تجهیزات، پیدا کردن فضای فیزیکی برای استقرار تجهیزات جدید به مرور دشوارتر می شود. علاوه بر این باید افزایش هزینه و تاخیر ناشی از آموزش کارکنان برای کار با تجهیزات جدید را نیز در نظر گرفت. بدتر این که هر چه نوآوری سرویسها و فناوری شتاب بیشتری میگیرد، چرخه عمر سختافزارها کوتاهتر میشود که مانع از ایجاد نوآوری در سرویس های شبکه می شود.

در روش سنتی استقرار سرویس شبکه، ترافیک کاربر باید از تعدادی کارکرد شبکه به ترتیب معینی عبور کند تا یک مسیر پردازش ترافیک ایجاد شود. در حال حاضر این کارکردها به صورت سخت افزاری به یکدیگر متصل هستند و ترافیک با استفاده از جداول مسیریابی به سمت آن ها هدایت می شود. چالش اصلی این روش در این است که استقرار و تغییر ترتیب کارکردها دشوار است. به عنوان مثال، به مرور زمان با تغییر شرایط شبکه نیازمند تغییر همبندی و یا مکان کارکردها برای سرویس دهی بهتر به کاربران هستیم که نیاز به جا به جایی کارکردها و تغییر جداول مسیریابی دارد. در روش سنتی این کار سخت و هزینه بر است که ممکن است خطاهای بسیاری در آن رخ دهد. از جنبه دیگر، تغییر سریع سرویس های مورد نظر کاربران نیازمند تغییر سریع در ترتیب کارکردها است که در روش فعلی این تغییرات به سختی صورت گیرد. بنابراین اپراتورهای شبکه نیاز به شبکه های قابل برنامه ریزی و ایجاد زنجیره سرویس کارکردها به صورت پویا پیدا کرده اند.

دو فناوری برای پاسخگویی به این چالشها مطرح شد: مجازی سازی کارکرد شبکه یا NFV زنجیره سازی کارکردهای سرویس یا SFC هدف از NFV این است که کارکردها بتوانند روی سخت افزارهای استاندارد اجرا شوند تا نیاز به سخت افزارهای خاص منظوره کاهش یابد. از طرف دیگر SFC امکان تعریف زنجیره ی کارکردها به صورت پویا و در هر زمان را ارائه می کند که تغییر در زیرساخت فیزیکی را کاهش می دهد.

از آنجایی که از مفاهیم این فناوری ها برای طراحی و تعریف مساله در این رساله استفاده شده است، نیازمند آشنایی با مفاهیم ابتدایی و اصول اولیه آن ها خواهیم بود.

بنابراین در این فصل به صورت خلاصه اجزای این فناوری ها را مرور خواهیم کرد و کاربردها، چالش ها و مسائل تحقیقاتی که در هر یک از این معماری ها وجود دارد را مورد بررسی قرار خواهیم داد.

۲-۲ مجازی سازی کارکرد شبکه

مجازی سازی کارکرد شبکه اصل جداسازی کارکرد شبکه به وسیله انتزاع سخت افزاری مجازی از سخت افزاری است که بر روی آن اجرا می شود. هدف مجازی سازی کارکرد شبکه تغییر روش اپراتورهای شبکه در طراحی شبکه با تکامل مجازی سازی استاندارد فناوری اطلاعات به منظور تجمیع تجهیزات شبکه در سرورهای استاندارد، سویچ ها و ذخیره سازها با توان بالا است. یک سرور استاندارد با توان بالا سروری است که توسط اجزای استاندارد شده IT، مانند معماری x86 ساخته شده و در تعداد بالایی، مانند میلیون، فروخته می شود. ویژگی اصلی این سرورها این است که اجزای آن ها به راحتی از فروشندگان مختلف قابل خریداری و تعویض است. این تجهیزات می توانند در مراکز داده، گره های شبکه، یا مکان کاربران انتهایی قرار بگیرند.

مزایا و اهداف اساسی که NFV برای تحقق و دستیابی به آنها شکل گرفته است عبارتند از:

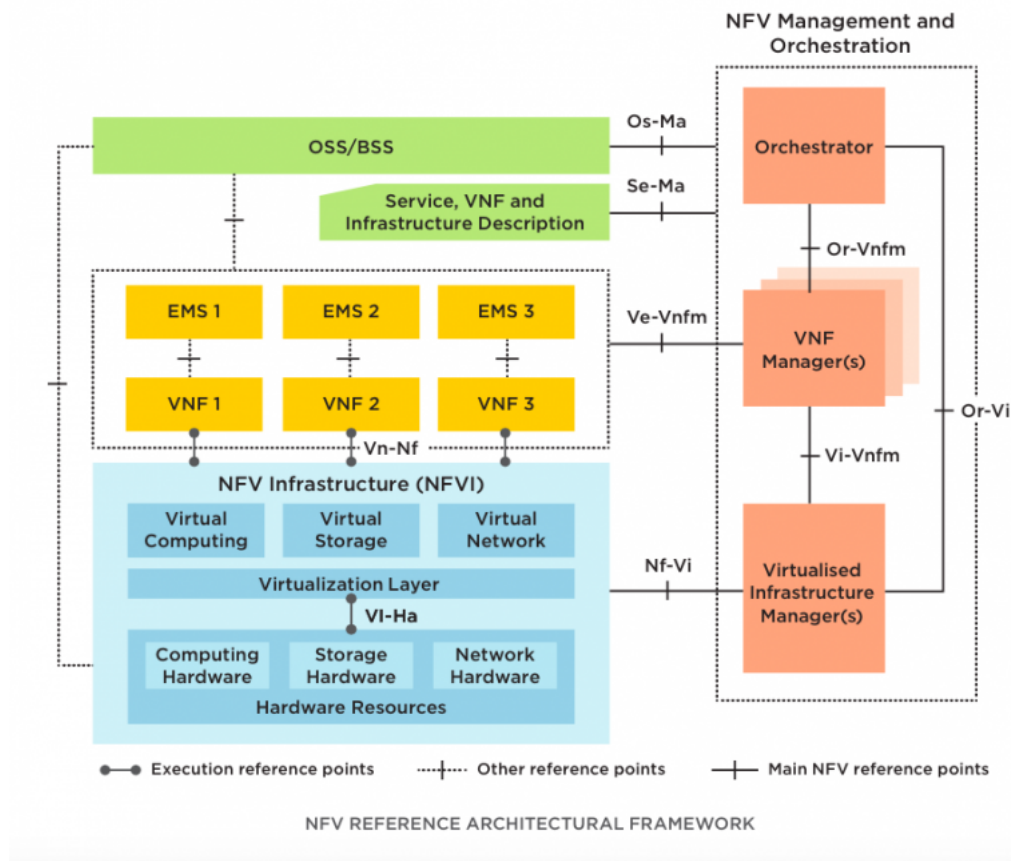
- کاهش هزینه‌های تجهیزات و مصرف انرژی از طریق تجمیع کارکردها بر روی سرورها و در نتیجه کاهش تعداد تجهیزات
- کاهش نیاز به آموزش کارکنان، افزایش دسترسی پذیری به سخت افزار و کاهش زمان بازیابی از خرابی سخت افزار به علت استفاده از سخت افزارهای استاندارد و عمومی
- افزایش سرعت عرضه محصول به بازار با کوتاه کردن چرخه نوآوری و تولید. در واقع NFV به اپراتورهای شبکه کمک میکند تا چرخه بلوغ محصول را به اندازه قابل توجهی کاهش دهند.
- امکانپذیر بودن تعریف سرویس مورد نظر بر اساس نوع مشتری یا محل جغرافیایی. مقیاس سرویسها میتواند به سرعت، بر اساس نیاز، گسترش یا کاهش یابد.
- تشویق به ایجاد نوآوری و ارائه سرویسهای جدید و دریافت جریانهای درآمدی تازه با سرعت بالا و ریسک پایین.
- افزایش توانایی مقابله با خرابی کارکردها، قابلیت به اشتراک گذاری منابع بین کارکردها و پشتیبانی از چند مشتری

سازمانهای استانداردگذاری متعددی در استانداردسازی فناوری NFV دخیل هستند که شاخصترین آنها موسسه استانداردهای مخابراتی اروپا (ETSI) است. در اواخر سال ۲۰۱۲، ETSI NFV ISG توسط هفت اپراتور جهانی شبکه به منظور ارتقا ایده مجازی سازی کارکرد شبکه تأسیس شد. ETSI NFV ISG تبدیل به یک بستر صنعتی اصلی برای توسعه چارچوب معماری NFV و نیازمندیهای آن شده است و اکنون بیش از ۲۵۰ سازمان با آن همکاری میکنند. اسناد معماری NFV به صورت عمومی و رایگان توسط ETSI NFV ISG منتشر می شود. ما در این رساله برای توصیف معماری NFV از اسناد ارائه شده این سازمان استفاده می کنیم.

۳-۲ معماری NFV

در این بخش مؤلفه‌های تشکیل دهنده معماری NFV شرح داده میشوند. هر یک از اجزای معماری میتوانند توسط تولیدکنندگان متفاوتی تأمین شوند و به وسیله واسطه‌هایی که توسط معماری NFV توصیف شده‌اند با یکدیگر در ارتباط باشند. بنابراین معماری NFV توصیف شده توسط ETSI راه حلی با قابلیت مشارکت و هماهنگی چندین تولیدکننده مختلف را دارد. با توجه به استاندارد ETSI معماری NFV از سه عنصر کلیدی تشکیل شده است. زیرساخت مجازی سازی کارکردهای شبکه، کارکردهای مجازی شبکه‌ای و NFV MANO. این اجزا در شکل ۱-۲ نمایش داده شده‌اند.

- NFVI: شامل منابع سخت افزاری و نرم افزاری لازم برای اجرای VNF ها
- Service: شامل VNF ها که کارکردهای شبکه را پیاده سازی کرده اند، EMS برای مدیریت VNF ها و OSS/BSS برای ارتباط با سیستم های مدیریت سنتی
- MANO: که وظیفه مدیریت و هماهنگی سرویس ها و تخصیص منابع را برعهده دارد و از سه بخش NFVO، VIM و VNFM تشکیل شده است.



شکل ۲-۱: معماری مجازی‌سازی کارکردهای شبکه

۴-۲ زیرساخت مجازی‌سازی کارکردهای شبکه

زیرساخت مجازی‌سازی کارکردهای شبکه ترکیبی از منابع نرم‌افزاری و سخت‌افزاری است که محیطی برای نصب کارکردهای مجازی شبکه فراهم می‌آورد. منابع سخت‌افزاری شامل منابع محاسباتی، ذخیره‌سازها و شبکه (شامل لینک‌ها و گره‌ها) هستند که پردازش، ذخیره‌سازی و ارتباط را برای کارکردهای مجازی شبکه فراهم می‌آورند. منابع مجازی انتزاعی از منابع شبکه‌ای، پردازشی و ذخیره‌سازی هستند. به وسیله انتزاع از طریق لایه‌ی مجازی‌سازی (بر پایه‌ی hypervisor) منابع سخت‌افزاری در اختیار کارکردهای مجازی قرار می‌گیرند که این منابع شامل منابع محاسباتی، شبکه‌ای و ذخیره‌سازی می‌باشند.

در مراکز داده‌ای ممکن است منابع پردازشی و ذخیره‌سازی تحت عنوان یک یا چند ماشین مجازی نمایش داده شوند در حالی که شبکه‌های مجازی از لینک‌ها و گره‌های مجازی تشکیل می‌شوند. شبکه‌های مجازی پیش از بحث مجازی‌سازی کارکردهای شبکه مدنظر بوده‌اند و روی آن‌ها کار شده است. در واقع از شبکه‌های مجازی در مراکز داده‌ای جهت فراهم آوردن شبکه‌های مختلف و مجزا که به کاربران مختلفی تعلق دارند استفاده شده است. راه‌حل‌های مختلفی برای پیاده‌سازی این شبکه‌ها وجود دارد. در بحث مجازی‌سازی کارکردهای شبکه، زیرساخت ارتباطی مورد نیاز برای کارکردهای مجازی از طریق همین شبکه‌های مجازی فراهم آورده می‌شود. یعنی مسائلی که پیشتر در بحث جایگذاری شبکه‌های مجازی مطرح بود امروز جزئی از مسائل جایگذاری زنجیره‌های کارکرد سرویس می‌باشند.

۵-۲ کارکردهای مجازی شبکه

یک کارکرد شبکه، یک بلوک عملیاتی در زیرساخت شبکه است که عملکرد رفتاری و رابط‌های ارتباط با خارج خوش تعریف دارد. مثال‌هایی از کارکردهای شبکه می‌تواند شامل DHCP یا firewall و ... باشد. با این توضیحات کارکرد مجازی شبکه، پیاده‌سازی یک کارکرد شبکه است که می‌تواند روی منابع مجازی شده اجرا شود. از هر کارکرد شبکه می‌توان نمونه‌سازی کرده و چند نمونه را در شبکه مستقر ساخت. این نمونه‌ها می‌توانند برای سرویس‌دهی به زنجیره‌های مختلف استفاده شوند. از آنجایی که هر نمونه توان پردازشی محدودی دارد با افزایش تعداد نمونه‌ها می‌توان توان پردازشی یک کارکرد را نیز افزایش داد.

EM ۶-۲

این مولفه کارکردهای FCAPS را برای VNF ها انجام می‌دهد که شامل مدیریت خطا، پیکربندی، امنیت، حسابداری و کارایی برای کارکردی است که VNF ارائه می‌دهد. این مولفه ممکن است آگاه از مجازی کارکرد باشد و با همکاری VNFM عملکردهای خودش را انجام بدهد.

OSS/BSS ۷-۲

این مولفه، ترکیبی از سایر بخش‌های عملکردهای اپراتور است که در چارچوب معماری NFV ارائه شده از طرف ETSI قرار نمیگیرند. به عنوان مثال می‌تواند شامل مدیریت سیستم‌های Legacy باشد.

NFV MANO ۸-۲

بر اساس چهارچوب پیشنهادی ETSI وظیفه‌ی NFV MANO فراهم آوردن کارکردهای لازم برای تدارک و فرآیندهای مشابه مانند تنظیم کردن و ... کارکردهای مجازی شبکه است. NFV MANO شامل هماهنگ‌کننده و مدیریت‌کننده چرخه‌ی زندگی منابع سخت‌افزاری و نرم‌افزاری که مجازی‌سازی زیرساخت را پشتیبانی می‌کنند، است. هر زنجیره نیاز دارد که حداقل توسط یک VNFM مدیریت شود تا مثلاً خطاهای آن را تحت نظر قرار دهد و در صورت نیاز در قسمت دیگری از شبکه استقرار یابد. مساله‌ی جایگذاری زنجیره‌ها بسیار مورد مطالعه قرار گرفته است، اما در این بین توجه لازم به نیاز این زنجیره‌ها به یک VNFM صورت نپذیرفته است.

فصل سوم

کارهای مرتبط

در [۵] نویسندگان قصد دارند با در نظر گرفتن محدودیت ظرفیت لینک‌ها و محدودیت پردازشی نودها بیشترین تعداد زنجیره‌ی کارکرد را بپذیرند. برای این کار یک مساله‌ی ILP طراحی می‌کنند و ثابت می‌کنند که این مساله NP-Hard می‌باشد. با توجه به NP-Hard بودن مساله الگوریتم مکاشفه‌ای MASRN پیشنهاد می‌گردد. این الگوریتم یک الگوریتم حریصانه می‌باشد که براساس منابع سرورها و بار لینک‌ها جایگذاری را انجام می‌دهد. در این مقاله وجود VNFM برای زنجیره‌ها در نظر گرفته نشده است.

در [۲] نویسندگان استفاده از VNFM را مدنظر قرار داده‌اند. در این مقاله فرض شده است که جایگذاری SFCها صورت گرفته است و می‌خواهیم VNFMها را به گونه‌ای استقرار دهیم که با رعایت شدن نیازمندی‌های کارآیی، هزینه‌ی عملیاتی سیستم حداقل شود. مساله مطرح شده به صورت ILP مدلسازی می‌شود. این مقاله هزینه‌ی عملیاتی سیستم را تحت چهار عنوان دسته‌بندی می‌کند: هزینه‌ی مدیریت چرخه‌ی زندگی، هزینه‌ی منابع محاسباتی، هزینه‌ی مهاجرت و هزینه‌ی بازنگاشت. در این مقاله فرض می‌شود که هر نمونه از VNFMها می‌تواند به تعداد مشخصی از نمونه‌های VNF سرویس‌دهی کند و این سرویس‌دهی به نوع نمونه وابسته نیست. این مقاله محدودیت‌های پردازشی و ظرفیتی را مدنظر قرار می‌دهد.

در [۷] نویسندگان سه مرحله برای عملیات جایگذاری زنجیره‌های کارکرد سرویس معرفی می‌کنند: انتخاب، جابجایی و مسیریابی. در این مقاله فرض می‌شود برای هر نوع VNF چند مدل مختلف با مصرف منابع مختلف وجود دارند که می‌توان از آن‌ها نمونه ساخت، در این مرحله مشخص می‌شود از کدام مدل نمونه‌سازی صورت می‌گیرد. این مقاله جایگذاری یک SFC را مدل‌سازی می‌کند، در این مقاله فرض می‌شود جریان ورودی و خروجی از هر نمونه برابر بوده و در واقع VNF تغییری بر روی ترافیک ایجاد نمی‌کند. در مدل‌سازی این مقاله که به صورت ILP می‌باشد هدف کاهش هزینه در جایگذاری SFC داده شده می‌باشد. با در نظر گرفتن مدل‌های مختلف برای VNFها در این مقاله در صورتی که نیاز به پردازش ترافیک زیادی باشد، چند نمونه از یک نوع VNF ساخته می‌شود و ترافیک بین آن‌ها تقسیم می‌شود.

در [۱۳] نویسندگان برای اولین بار مساله‌ی Traffic Streering با در نظر گرفتن QoS و Reliability فرمول‌بندی کرده‌اند. این مقاله کاربرد NFV را در شبکه‌های موبایل مدنظر قرار داده است. در این مقاله مساله به صورت Link-Path مدل‌سازی شده است و فرض شده است که مسیرهای ممکن برای جایگذاری کلاس‌های ترافیکی از پیش تعیین شده‌اند. در این مقاله منظور از کیفیت سرویس تاخیر و گذردهی کلاس‌های ترافیکی می‌باشد و برای فراهم آوردن قابلیت اطمینان فرض می‌شود که خرابی‌ها به صورت دلخواه بوده و در صورت خرابی بخشی از پهنای باند از دست می‌رود.

در [۸] نویسندگان مساله‌ی جایگذاری و مسیریابی زنجیره‌های کارکرد سرویس را به صورت توأمان مدل‌سازی می‌کنند، در این مساله نویسندگان تاثیر دو پارامتر Coordination Effect و Traffic-Change Effect را نیز مدنظر قرار داده‌اند. زمانی که چند VM در پیاده‌سازی یک کارکرد شبکه استفاده می‌شوند نیاز است که بین این ماشین‌های مجازی هماهنگی صورت بگیرد. برای این هماهنگی ارتباطاتی صورت می‌گیرد که دارای سربار بوده و به این سربار Coordination Effect می‌گویند. هر کارکرد شبکه می‌تواند روی ترافیک ورودی خود تاثیر گذاشته و نرخ آن را تغییر دهد که این موضوع را با Traffic-Change Effect بیان می‌کنند.

در [۴] نویسندگان قصد دارند به صورت قطعی کیفیت سرویس را گارانتی نمایند. این مقاله پیاده‌سازی NFV را با استفاده از SDN هدف قرار می‌دهد و برای محاسبه‌ی تاخیر، تاخیر پیام‌های کنترلی SDN و تاخیر جابجایی بسته‌ها را در نظر می‌گیرد. برای پیشنهاد یک راه‌حل قطعی از Network Calculus استفاده می‌شود که شرایط مرزی را بررسی می‌کند. این شرایط مرزی برای پیام‌های کنترلی محاسبه شده و از آن تاخیر مورد نظر در جابجایی بسته‌ها بدست می‌آید که با استفاده از آن یک مساله‌ی بهینه‌سازی با هدف رعایت تاخیر بدست آمده حاصل می‌شود.

در [۱۰] نویسندگان پیاده‌سازی NFV با SDN را هدف قرار داده‌اند و جایگذاری middle boxها با هدف توزیع بار را فرمول‌بندی کرده‌اند. در واقع middle boxها در این مقاله به صورت مجازی بوده و همان کارکردهای مجازی شبکه می‌باشند. مدل‌سازی صورت

گرفته به صورت node link صورت پذیرفته است. هدف مساله مسیریابی چند مسیره برای تقاضا به صورتی است که در آن link load ratio برای تمام لینکها می نیمم شود. این مقاله تغییر ترافیک توسط کارکردها را نیز مدنظر قرار داده است.

در [۹] مساله ی جایگذاری زنجیره های کارکرد سرویس با دو هدف کاهش مصرف انرژی و افزایش نرخ جریان پذیرفته شده مدل سازی می شود. این مدل سازی با توجه به معماری IETF SFC صورت پذیرفته است. در مدلسازی این مقاله جزئیات زیادی مورد توجه قرار گرفته است که این امر باعث پیچیده شدن فرمول بندی شده است.

در [۶] نویسندگان ابتدا مساله ی جایگذاری و مسیریابی VNFها را در اوج ترافیک حل می کنند. در ادامه آنها فرض می کنند که ترافیک به صورت دوره ای-ثابت می باشد به این معنا که ترافیک در تعداد متناهی بازه ی زمانی تعریف شده و تکرار می شود. با این فرض در ادامه مقاله مساله ی دیگری مبنی بر مهاجرت نمونه ها با توجه به تغییر ترافیک را مطرح می کند. در این مهاجرت ها مقاله از توان مصرفی در مهاجرت صرف نظر کرده و تلاش می کند جریمه ای که بابت قطعی سرویس پرداخت می شود و توان مصرفی کل سیستم را بهینه کند.

در [۱۲] نویسندگان مساله ی توزیع بار در NFV را بررسی می کنند، آنها در این مساله ویژگی های پایه ای NFV در کنار استفاده از روش ECMP مدنظر قرار می دهد. در روش ECMP بار بین مبدا و مقصد به صورت یکسان بین تمام مسیرها تقسیم می گردد. در این مساله تعدادی تقاضا در نظر گرفته می شود که کوتاهترین مسیرها بین مبدا و مقصد آنها مشخص است و در نهایت بار در این مسیرها توزیع شده و کارکردها شبکه ای نیز در این مسیرها مستقر می شوند.

جدول ۳-۱: مقایسه مقالات پذیرش زنجیره های کارکرد سرویس

منبع	منابع تخصیص یافته	محدودیت ظرفیت پردازشی نمونه	برخط یا برون خط	نگاشت کارکرد و لینک	انتساب کارکرد	اشتراک نمونه	تخصیص VNFM									
#	other	MEM	BW	CPU	دارد	برخط	برون خط	کارکرد لینک	یک نمونه	چند نمونه	دارد	ندارد	دارد	ندارد	دارد	ندارد
[۵]	—	—	✓	✓	—	✓	—	✓	✓	—	✓	—	✓	—	✓	—
[۷]	—	—	✓	✓	—	✓	—	✓	✓	—	✓	—	✓	—	✓	—
[۸]	—	—	✓	✓	—	✓	—	✓	✓	—	✓	—	✓	—	✓	—
پژوهش حاضر	—	✓	✓	✓	✓	—	✓	✓	✓	—	✓	—	✓	—	✓	—

همانطور که در کارهای بیان شده دیده می شود، مساله ی تخصیص منابع مدیریتی در پذیرش زنجیره های کارکرد مورد بررسی قرار نگرفته است و در پژوهش حاضر قصد داریم این مورد را بررسی نماییم.

فصل چهارم

تعریف مساله

۴-۱ مساله

پذیرفتن بیشترین تقاضای زنجیره کارکرد سرویس با در نظر گرفتن انتساب هر نمونه کارکرد مجازی شبکه به یک VNFM. همانطور که در مستند [۱] نیز آمده است، نیاز است که هر یک نمونه‌های کارکردهای مجازی شبکه توسط حداقل یک VNFM مدیریت شوند. در این مساله قصد داریم مساله پذیرش تقاضاهای زنجیره‌های کارکرد سرویس را با نظر گرفتن این نیازمندی در کنار نیازمندی‌های پردازی و پهنای‌بند هر یک از تقاضاها حل کنیم. در ادامه به صورت خلاصه شرایط مساله را بررسی می‌کنیم:

- توپولوژی زیرساخت شامل پهنای باند لینک‌ها و ظرفیت NFVI-PoP^۱ها^۲ موجود است.
 - n تقاضای زنجیره کارکرد سرویس به صورت کامل و از پیش مشخص شده داریم.
 - هر تقاضا شامل نوع و تعداد نمونه‌های مجازی، پهنای باند لینک‌های مجازی و توپولوژی نمونه‌های مجازی می‌باشد.
 - F نوع کارکرد مجازی شبکه تعریف شده است که هر یک مقدار مشخصی از حافظه و توان پردازی را مصرف می‌کنند.
 - تعداد پردازنده‌هایی که به هر نمونه تخصیص می‌یابد با توجه به ترافیک ورودی نمونه مشخص می‌شود. این امر توسط اپراتور در زمان تعریف مساله ورودی صورت می‌گیرد.
 - نمونه‌ها بین زنجیره‌ها به اشتراک گذاشته نمی‌شوند.
 - محدودیت ظرفیت لینک‌ها
 - محدودیت توان پردازش سرورهای فیزیکی با توجه به میزان حافظه و تعداد پردازنده‌ها
 - برای مدیریت یکدست و آسان‌تر زنجیره‌ها و در عین حال جمع‌آوری راحت‌تر خطاها، برای هر زنجیره یک VNFM فیزیکی تخصیص می‌دهیم.
 - VNFM می‌تواند بین زنجیره به اشتراک گذاشته شوند.
 - هر نمونه از VNFM می‌تواند تعداد مشخصی از نمونه‌های کارکرد مجازی شبکه را سرویس دهد.
 - برای ارتباط میان هر نمونه از VNFM و VNFها پهنای باند مشخصی رزرو می‌گردد.
 - در صورتی که NFVI-PoP بتواند از VNFM پشتیبانی نماید می‌توان به هر تعداد که ظرفیت آن اجازه می‌دهد بر روی آن VNFM مستقر کرد.
 - هر نمونه از VNFM جهت استفاده نیاز به تهیه جواز^۲ دارد.
- اگر جایگذاری VNFMها به صورت غیر برنامه‌ریزی شده صورت بپذیرد ممکن است به تاخیرهای غیرقابل تحمل منجر شده و به این ترتیب تاثیر منفی بر روی کارایی سیستم داشته باشد.
- یکی از وظایف VNFMها جمع‌آوری پیام‌های خطا می‌باشد، برای این امر نیاز است که پهنای باند کوچک اما اختصاصی به VNFMها تخصیص داده شود بنابراین نمی‌توان جایگذاری آن‌ها را با روش‌های سابق و مانند سایر کارکردهای مجازی شبکه فرض کرد. از آنجایی که VNFM نیاز به مجوز دارند می‌توان با به اشتراک گذاشتن آن‌ها در هزینه‌های سیستم صرفه‌جویی کرد. در نظرگرفتن VNFM همراه با VNFها مساله‌ای جدیدی است.

NFVI Point of Presence^۱
license^۲

۲-۴ فرمول‌بندی

هدف اصلی مساله پذیرش بیشترین تعداد تقاضا می‌باشد. در اینجا فرض می‌کنیم پذیرش هر تقاضا سودی منحصر به فرد خواهد داشت. بنابراین تابع هدف به شکل زیر می‌باشد:

$$\max \sum_{h=1}^T c_h x_h - \sum_{w \in V_s^{PN}} licenseFee * \bar{y}_w \quad (4-1)$$

$memory(k)$	required RAM of VNF instance with type k in GB
$core(k)$	required CPU cores of VNF instance with type k
$mem\bar{o}ry$	required RAM of VNFM in GB
$c\bar{o}re$	required CPU cores of VNFM
$capacity$	maximum number of VNF instances that VNFM can handle
$len(h)$	number of VNF instances in h th SFC request
$type(v, k)$	assuming the value 1 if the VNF instance v has type k
$bandwidth(u, v)$	required bandwidth in link from VNF instance u to v
$\hat{bandwidth}$	required bandwidth in managment link
$radius$	maximum neighborhood distance for instance management
$licenseFee$	VNFM license fee that must pay for each VNFM
$vnfSupport(w)$	assuming the value 1 if the physical server w can support VNF instances
$isManageable(k)$	assuming the value 1 if the type k needs a manager
$notManagableBy(w1, w2)$	assuming the value 1 if the physical server $w1$ cannot manage by physical server $w2$

x_h	binary variable assuming the value 1 if the h th SFC request is accepted; otherwise its value is zero
y_{wk}	the number of VNF instances of type k that are used in server $w \in V_s^{PN}$
z_{vw}^k	binary variable assuming the value 1 if the VNF node $v \in \cup_{i=1}^T V_{i,F}^{SFC}$ is served by the VNF instance of type k in the server $w \in V_s^{PN}$
\bar{y}_w	the number of VNFMs (each vnfm has its capacity and license fee) that are used in server $w \in V_s^{PN}$
\bar{z}_{hw}	binary variable assuming the value 1 if h th SFC is assigned to VNFM on server $w \in V_s^{PN}$

برای هر نود اندازه‌ی مشخصی از حافظه RAM در نظر گرفته می‌شود که هر نمونه‌ی کارکرد با توجه به نوع آن مقدار مشخصی از این حافظه را مصرف می‌کند. VNFM نیز مقدار مشخصی از حافظه را مصرف می‌کند.

Node Memory Constraint:

$$\sum_{k=1}^F y_{wk} memory(k) + \bar{y}_w mem\bar{o}ry \leq N_{ram}^{PN}(w) \quad \forall w \in V_s^{PN} \quad (4-2)$$

برای هر نود تعداد مشخصی از هسته‌های پردازنده در نظر گرفته می‌شود که هر نمونه‌ی کارکرد با توجه به نوع آن مقدار مشخصی از این تعداد را مصرف می‌کند. VNFM نیز مقدار مشخصی از تعداد هسته‌های پردازنده را مصرف می‌کند.

Node CPU Constraint:

$$\sum_{k=1}^F y_{wk} core(k) + \bar{y}_w core \leq N_{core}^{PN}(w) \quad \forall w \in V_s^{PN} \quad (4-3)$$

اگر VNF، v توسط VNF instance نوع k روی سرور w سرویس شود میبایست VNF instance نوع k روی سرور w فعال شود. توجه شود که اشتراک گذاری VNF ها پشتیبانی نمیگردد.

Service Place Constraint:

$$\sum_{v \in \cup_{i=1}^T V_{i,F}^{SFC}} z_{vw}^k \leq y_{wk} \quad \forall w \in V_s^{PN}, \forall k \in [1, \dots, F] \quad (4-4)$$

اگر تقاضای h پذیرفته شده باشد میبایست تمام VNF node های آن سرویس شده باشند. یک VNF حداکثر یکبار سرویس داده شود.

Service Constraint:

$$x_h = \sum_{k=1}^F \sum_{w \in V_s^{PN}} z_{vw}^k \quad \forall v \in V_{h,F}^{SFC}, \forall h \in [1, \dots, T] \quad (4-5)$$

اگر تقاضای h پذیرفته شده باشد میبایست توسط یک VNFM سرویس شده باشد.

Manage Constraint:

$$x_h = \sum_{w \in V_s^{PN}} \bar{z}_{hw} \quad \forall h \in [1, \dots, T] \quad (4-6)$$

محدودیت ظرفیت سرویس دهی VNFM این محدودیت براساس تعداد ماشین های محازی که هر VNFM سرویس می دهد تعیین شده است. در نظر داشته باشید که ممکن است برخی از انواع VNF ها نیازی به مدیریت شدن نداشته باشند.

Manage Capacity Constraint & Manage Place Constraint:

$$\sum_{i=1}^T \bar{z}_{iw} * (len(i) - \sum_{v \in V_{i,F}^{SFC}} \sum_{k \in [1, \dots, F]} type(v, k) * isManageable(k)) \leq capacity * \bar{y}_w \quad \forall w \in V_s^{PN} \quad (4-7)$$

اگر VNF، v توسط instance نوع k روی سرور w سرویس شود میبایست خود از نوع k باشد.

Type Constraint:

$$z_{vw}^k \leq type(v, k) \quad \forall w \in V_s^{PN}, \forall k \in [1, \dots, F], \forall v \in \cup_{i=1}^T V_{i,F}^{SFC} \quad (4-8)$$

در صورتی که سرور w توانایی اجرای نمونه های VNF را نداشته باشد نباید نمونه ای روی آن قرار گیرد.

VNF support constraint

$$\sum_{k \in [1, \dots, F]} y_{wk} = M * vnfSupport(w) \quad w \in V_s^{PN} \quad (4-9)$$

برخی از سرورهای نمی توانند توسط سرورهای مشخصی مدیریت شوند. این ویژگی به ادمین شبکه امکان مدیریت بیشتری می دهد و او می تواند با دست باز تمامی سیاست های مورد نظرش را اعمال نماید.

Manager to node support constraint

$$1 - z_{vw_1}^k + \bar{z}_{hw_2} = 0 \quad \forall w_1 \in V_s^{PN} \forall w_2 \in V_s^{PN} \text{notManagableBy}(w_1, w_2) = 1$$

$$\forall h \in [1, \dots, T], \forall v \in V_{h,F}^{SFC}, \forall k \in [1, \dots, T] \quad (4-10)$$

$\tau_{ij}^{(u,v)}$	binary variable assuming the value 1 if the virtual link (u, v) is routed on the physical network link (i, j)
$\bar{\tau}_{ij}^v$	binary variable assuming the value 1 if the managemnt of VNF node v is routed on the physical network link (i, j)

محدودیت زیر بقای جریان در لینکهای مورد تقاضای کاربر را تضمین می کند.

Flow Conservation:

$$\sum_{(i,j) \in E^{PN}} \tau_{ij}^{(u,v)} - \sum_{(j,i) \in E^{PN}} \tau_{ji}^{(u,v)} = \sum_{k=1}^F z_{ui}^k - \sum_{k=1}^F z_{vi}^k$$

$$\forall i \in V_S^{PN}, (u, v) \in E_h^{SFC}, h \in [1, \dots, T] \quad (4-11)$$

محدودیت زیر بقای جریان در لینکهای مدیریتی را تضمین می کند.

Management flow Conservation:

$$\sum_{(i,j) \in E^{PN}} \bar{\tau}_{ij}^v - \sum_{(j,i) \in E^{PN}} \bar{\tau}_{ji}^v = \sum_{k=1}^F z_{vi}^k - \bar{z}_{hi}$$

$$\forall i \in V_S^{PN}, v \in V_{h,F}^{SFC}, h \in [1, \dots, T] \quad (4-12)$$

محدودیت ظرفیت لینکها

Link Bandwidth Constraint:

$$\sum_{v \in \cup_{i=1}^T V_{i,F}^{SFC}} \bar{\tau}_{ij}^v * bandwidth + \sum_{(u,v) \in \cup_{i=1}^T E_i^{SFC}} \tau_{ij}^{(u,v)} * bandwidth(u, v) \leq C_{ij}$$

$$\forall (i, j) \in E^{PN} \quad (4-13)$$

شعاع همسایگی تضمین می کند که زمان سرویس دهی توسط VNFها در یک بازه مشخص (از نظر تعداد هاب) خواهد بود.

Radius Constraint

$$\sum_{(i,j) \in E^{PN}} \bar{\tau}_{ij}^v \leq radius \quad \forall v \in \cup_{i=1}^T V_{i,F}^{SFC} \quad (4-14)$$

فصل پنجم

راه حل پیشنهادی

مساله‌ی بیان شده به صورت ILP مدل‌سازی می‌شود. در [۵] مساله‌ی جایگذاری SFCها با هدف حداکثرسازی تعداد درخواست‌های پذیرفته شده به صورت ILP مدل‌سازی شده و اثبات شده است که مساله‌ی حاضر NP-Hard می‌باشد. مساله‌ای که در اینجا مدل‌سازی می‌شود از آن مساله پیچیده‌تر می‌باشد زیرا در نظر گرفتن VNFMها را نیز شامل می‌شود. برای این مساله می‌توان یک راه حل مکاشفه‌ای با زمان چند جمله‌ای پیشنهاد داد.

۵-۱ الگوریتم مکاشفه‌ای

مساله از دو قسمت تشکیل شده است. قسمت اول مساله‌ی جایگذاری لینک‌ها و نمونه‌ها می‌باشد و قسمت دوم جایگذاری VNFM برای زنجیره است. برای قسمت اول راه‌حل‌های مکاشفه‌ای زیادی ارائه شده است که ما در اینجا از راه حل [۳] استفاده می‌کنیم. در این راه حل برای قرارگیری هر زنجیره یک گراف چند گامی شکل می‌گیرد. هر گام این گراف نماینده یک نمونه از زنجیره است که می‌بایست قرار گیرد. در نظر داشته باشید که در مساله‌ای اصلی نیازی نیست که حتماً زنجیره‌ها به صورت خطی باشند اما در این راه‌حل این فرض وجود دارد که البته فرضی نزدیک به واقعیت می‌باشد. در هر گام از این گراف مجموعه‌ای از نودهای فیزیکی امکان پذیر شکل می‌گیرد. با توجه به وضعیت مسیریابی این مجموعه با مجموعه بعدی نود فیزیکی برای نمونه مورد نظر از زنجیره انتخاب می‌شود.

منظور از وضعیت مسیریابی به شرح زیر است. برای هر یک از گام‌ها از الگوریتم جستجوی اول سطح یا BFS استفاده می‌کنیم و به این ترتیب مسیرهای فیزیکی که می‌توان از آن‌ها برای جایابی لینک مجازی استفاده کرد پیدا می‌کنیم. از این بین گره‌ای که مسیرهای فیزیکی امکان‌پذیر بیشتری دارد انتخاب می‌گردد. با این روش مجموعه امکان‌پذیر گام بعدی بزرگتر می‌شود و امکان حذف زنجیره به دلیل نبود مسیر فیزیکی برای جایابی لینک مجازی کمتر می‌گردد.

در ادامه یک گام به این الگوریتم اضافه می‌کنیم که در آن برای هر زنجیره بعد از قرار گرفتن یک VNFM تخصیص می‌دهیم. برای اینکار مجموعه‌ای امکان‌پذیر از نودهای فیزیکی را انتخاب می‌کنیم و سعی می‌کنیم از بین آن‌ها انتخاب کنیم. در روند این انتخاب از اصول زیر پیروی می‌کنیم:

- اولویت با نود فیزیکی است که روی آن VNFM با ظرفیت خالی وجود دارد.

- از بین نودهایی که ظرفیت خالی دارند اولویت با نودی است که منابع پردازشی بیشتری دارد.

از آنجایی که مساله‌ی طرح شده به صورت آفلاین می‌باشد می‌توان با بررسی ورودی‌های الگوریتم کارایی آن را بهبود داد. برای این منظور زنجیره‌های ورودی را برحسب اندازه‌ی آن‌ها مرتب می‌کنیم. در این مرتب‌سازی تلاش می‌شود که زنجیره‌های بزرگتر که سود بیشتری دارند زودتر جایابی شوند.

فصل ششم ارزیابی

در این مساله هدف پذیرش تعداد بیشینه‌ی تقاضاهای زنجیره‌ی کارکرد سرویس می‌باشد که به این ترتیب معیار مقایسه نیز همین پارامتر خواهد بود. این پارامتر در ارزیابی با سایر مقالات مقایسه می‌شود ولی باید در نظر داشت که نیازمندی‌های مدیریتی که در این پژوهش مدنظر است در سایر پژوهش‌ها مدنظر نبوده است. راه‌حل پیشنهادی بهینه نبوده و به همین علت کارآیی آن در سناریوهایی با حل بهینه مقایسه می‌شود.

منابع و مراجع

- [1] Etsi gs nfv-man 001 v1.1.1: Network function virtualization (nfv): Management and orchestration. Technical report, december 2014.
- [2] Abu-Lebdeh, Mohammad, Naboulsi, Diala, Glitho, Roch, and Tchouati, Constant Wette. On the placement of VNF managers in large-scale and distributed NFV systems. *IEEE Transactions on Network and Service Management*, 14(4):875–889, dec 2017.
- [3] Bari, Md. Faizul, Chowdhury, Shihabur Rahman, Ahmed, Reaz, and Boutaba, Raouf. On orchestrating virtual network functions. In *2015 11th International Conference on Network and Service Management (CNSM)*. IEEE, November 2015.
- [4] Chen, Yu-Jia, Wang, Li-Chun, Lin, Feng-Yi, and Lin, Bao-Shuh Paul. Deterministic quality of service guarantee for dynamic service chaining in software defined networking. *IEEE Transactions on Network and Service Management*, 14(4):991–1002, dec 2017.
- [5] Eramo, V., Tosti, A., and Miucci, E. Server resource dimensioning and routing of service function chain in NFV network architectures. *Journal of Electrical and Computer Engineering*, 2016:1–12, 2016.
- [6] Eramo, Vincenzo, Miucci, Emanuele, Ammar, Mostafa, and Lavacca, Francesco Giacinto. An approach for service function chain routing and virtual function network instance migration in network function virtualization architectures. *IEEE/ACM Transactions on Networking*, 25(4):2008–2025, aug 2017.
- [7] Ghaznavi, Milad, Shahriar, Nashid, Kamali, Shahin, Ahmed, Reaz, and Boutaba, Raouf. Distributed service function chaining. *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*, 35(11):2479–2489, nov 2017.
- [8] Huang, Huawei, Li, Peng, Guo, Song, Liang, Weifa, and Wang, Kun. Near-optimal deployment of service chains by exploiting correlations between network functions. *IEEE Transactions on Cloud Computing*, pages 1–1, 2017.
- [9] Jang, Insun, Suh, Dongeun, Pack, Sangheon, and Dan, Gyorgy. Joint optimization of service function placement and flow distribution for service function chaining. *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*, 35(11):2532–2541, nov 2017.
- [10] Ma, Wenrui, Beltran, Jonathan, Pan, Zhenglin, Pan, Deng, and Pissinou, Niki. SDN-based traffic aware placement of NFV middleboxes. *IEEE Transactions on Network and Service Management*, 14(3):528–542, sep 2017.

-
- [11] Mijumbi, Rashid, Serrat, Joan, Gorricho, Juan-Luis, Bouten, Niels, Turck, Filip De, and Boutaba, Raouf. Network function virtualization: State-of-the-art and research challenges. *IEEE Communications Surveys & Tutorials*, 18(1):236–262, 2016.
- [12] Pham, Tuan-Minh, Nguyen, Thi-Thuy-Lien, Fdida, Serge, and Binh, Huynh Thi Thanh. Online load balancing for network functions virtualization. In *2017 IEEE International Conference on Communications (ICC)*. IEEE, may 2017.
- [13] Yu, Ruozhou, Xue, Guoliang, and Zhang, Xiang. QoS-aware and reliable traffic steering for service function chaining in mobile networks. *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*, 35(11):2522–2531, nov 2017.