



دانشگاه صنعتی امیرکبیر

(پلی تکنیک تهران)

دانشکده مهندسی کامپیوتر و فناوری اطلاعات

پایان نامه کارشناسی ارشد

گرایش شبکه های کامپیوتری

زنجیره سازی کارکردهای مجازی سرویس شبکه با لحاظ محدودیت  
منابع مدیریتی

نگارش

پرهام الوانی

استاد راهنما

دکتر بهادر بخشی

شهریور ۱۳۹۸

بِسْمِ اللَّهِ الرَّحْمَنِ الرَّحِيمِ

## صفحه فرم ارزیابی و تصویب پایان نامه- فرم تأیید اعضاء کمیته دفاع

در این صفحه فرم دفاع یا تأیید و تصویب پایان نامه موسوم به فرم کمیته دفاع- موجود در پرونده آموزشی- را قرار دهید.

### نکات مهم:

- نگارش پایان نامه/رساله باید به **زبان فارسی** و بر اساس آخرین نسخه دستورالعمل و راهنمای تدوین پایان نامه های دانشگاه صنعتی امیرکبیر باشد.(دستورالعمل و راهنمای حاضر)
- رنگ جلد پایان نامه/رساله چاپی کارشناسی، کارشناسی ارشد و دکترا باید به ترتیب مشکی، طوسی و سفید رنگ باشد.
- چاپ و صحافی پایان نامه/رساله بصورت **پشت و رو(دورو)** بلامانع است و انجام آن توصیه می شود.



دانشگاه صنعتی امیرکبیر  
(پلی تکنیک تهران)

به نام خدا

## تعهدنامه اصالت اثر

تاریخ: شهریور ۱۳۹۸

اینجانب پرهامالوانی متعهد می‌شوم که مطالب مندرج در این پایان‌نامه حاصل کار پژوهشی اینجانب تحت نظارت و راهنمایی اساتید دانشگاه صنعتی امیرکبیر بوده و به دستاوردهای دیگران که در این پژوهش از آنها استفاده شده است مطابق مقررات و روال متعارف ارجاع و در فهرست منابع و مآخذ ذکر گردیده است. این پایان‌نامه قبلاً برای احراز هیچ مدرک هم‌سطح یا بالاتر ارائه نگردیده است.

در صورت اثبات تخلف در هر زمان، مدرک تحصیلی صادر شده توسط دانشگاه از درجه اعتبار ساقط بوده و دانشگاه حق پیگیری قانونی خواهد داشت.

کلیه نتایج و حقوق حاصل از این پایان‌نامه متعلق به دانشگاه صنعتی امیرکبیر می‌باشد. هرگونه استفاده از نتایج علمی و عملی، واگذاری اطلاعات به دیگران یا چاپ و تکثیر، نسخه‌برداری، ترجمه و اقتباس از این پایان‌نامه بدون موافقت کتبی دانشگاه صنعتی امیرکبیر ممنوع است. نقل مطالب با ذکر مآخذ بلامانع است.

پرهامالوانی

امضا

این رساله هر چند کوچک را تقدیم میکنم به:

. دکتر بخشی که از ع سال شاکردی و همکاری ایشان برای من مایه افتخار بود

. دوستانم در دانشگاه امیرکبیر که امروز بسیاری شان از پیش مارفته اند اما خاطرشان  
همواره در یادم می ماند

. همکاری در تیم چارلی که نور جدیدی به زندگی من دادند

# 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 کرده و از پدر و مادرم که همواره من را حمایت کرده‌اند تشکر می‌کنم.

در نهایت جا دارد از دوست، همکار و مدیر خوبم سینا سعیدی مدیریت فنی تیم منابع مشترک شرکت ایده‌گزين ارتباطات روماک تشکر کنم که بدون حمایت‌های ایشان نگارش این پایان نامه ممکن نبود.

پروان الوانی  
شهریور ۱۳۹۸

## چکیده

مساله‌ی 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
۳	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
۶	۲-۲ مجازی سازی کارکرد شبکه
۷	۳-۲ معماری NFV
۷	۱-۳-۲ زیرساخت مجازی سازی کارکردهای شبکه یا NFVI
۸	۲-۳-۲ کارکردهای مجازی شبکه
۹	۳-۳-۲ EM
۹	۴-۳-۲ OSS/BSS
۹	۵-۳-۲ NFV MANO
۱۰	۳ کارهای مرتبط
۱۳	۴ تعریف مساله
۱۴	۱-۴ مساله
۱۵	۲-۴ فرمول بندی
۲۰	۵ راه حل پیشنهادی
۲۱	۱-۵ الگوریتم مکاشفه ای
۲۲	۶ ارزیابی
۲۳	۱-۶ مقدمه
۲۳	۲-۶ محیط ارزیابی
۲۴	۳-۶ معیارهای ارزیابی
۲۴	۱-۳-۶ نسبت سود به هزینه
۲۵	۲-۳-۶ سود
۲۵	۳-۳-۶ تعداد زنجیره های پذیرفته شده
۲۵	۴-۳-۶ تعداد VNF های استفاده شده
۲۵	۴-۶ محیط ارزیابی



۲۷	۵-۶ نتایج ارزیابی
۲۷	۱-۵-۶ زمان حل بهینه
۲۷	۲-۵-۶ نسبت سود به هزینه
۲۸	۳-۵-۶ زنجیره‌ها در توپولوژی FatTree
۲۹	۴-۵-۶ زنجیره‌ها در توپولوژی USnet

۳۱	منابع و مراجع
----	---------------

شکل	فهرست اشکال	صفحه
۱-۲	رویکرد NFV	۶
۲-۲	معماری مجازی سازی کارکردهای شبکه	۸
۱-۵	مدل سازی با گراف چندگامی [۴]	۲۱
۱-۶	توپولوژی ساختاریافته FatTree	۲۳
۲-۶	توپولوژی تصادفی USnet	۲۴
۳-۶	زمان حل الگوریتم بهینه	۲۷
۴-۶	کارآیی الگوریتم پیشنهادی و [۴] در نسبت های مختلف سود به هزینه	۲۸
۵-۶	سود نهایی الگوریتم های بهینه، پیشنهادی و [۴]	۲۸
۶-۶	تعداد زنجیره های پذیرفته شده الگوریتم های بهینه، پیشنهادی و [۴]	۲۹
۷-۶	تعداد VNFM های الگوریتم های بهینه، پیشنهادی و [۴]	۲۹
۸-۶	سود نهایی الگوریتم های بهینه، پیشنهادی و [۴]	۳۰
۹-۶	تعداد زنجیره های پذیرفته شده الگوریتم های بهینه، پیشنهادی و [۴]	۳۰
۱۰-۶	تعداد VNFM های الگوریتم های بهینه، پیشنهادی و [۴]	۳۰

صفحه	فهرست جداول	جدول
۱۲	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 نیازمندی‌هایی مانند پایداری و کیفیت بالا منجر به اتکای فراهم کنندگان سرویس بر سخت افزارهای اختصاصی می‌شود. این درحالی است که نیازمندی کاربران به سرویس‌های متنوع و عموماً با عمر کوتاه و نرخ بالای ترافیک افزایش یافته است. بنابراین فراهم کنندگان سرویس‌ها 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 می‌شود. با افزایش تجهیزات، پیدا کردن فضای فیزیکی برای استقرار تجهیزات جدید به مرور دشوارتر می‌شود. 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 سخت افزارها کوتاهتر میشود که مانع از ایجاد نوآوری در سرویس‌های شبکه می‌شود.

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 آن‌ها هدایت می‌شود. 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 سرویس‌دهی بهتر به کاربران هستیم که نیاز به جا به جایی کارکردها و تغییر جداول مسیریابی دارد. در روش سنتی این کار سخت و هزینه‌بر است که ممکن است خطاهای بسیاری در آن رخ دهد. از جنبه دیگر، تغییر سریع سرویس‌های 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 شبکه‌های قابل برنامه ریزی و ایجاد زنجیره سرویس کارکردها به صورت پویا پیدا کرده اند.

در سال‌های اخیر دو تکنولوژی شبکه‌های نرم افزارمحور و مجازی سازی شبکه بسیار مورد توجه قرار گرفته‌اند. پیشتر در ارائه سرویس‌های شبکه، از سخت افزارهای اختصاصی که توسط سازندگان اختصاصی ارائه می‌شد و به آن‌ها middle box گفته می‌شد استفاده می‌گشت. تنوع و تعداد رو به افزایش سرویس‌های جدیدی که توسط کاربران تقاضا می‌گردد باعث هزینه‌های 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 کرده‌اند، به این ترتیب آن‌ها قادر خواهند بود سرویس‌های نوآورانه‌ای به کاربران ارائه بدهند. این روند به سرویس دهندگان اجازه می‌دهد که ارائه سرویس‌های دلخواه‌شان وابسته به سخت افزارهای اختصاصی نباشد و هزینه‌های راه اندازی و نگهداری فراهم آورندگان سرویس را کاهش می‌دهد. با نرم افزاری سازی کارکردها، وابستگی آن‌ها به سخت افزار اختصاصی کاهش یافته و به سرعت می‌توان آن‌ها را افزایش/کاهش مقیاس داد. مجازی سازی کارکردهای شبکه و زنجیره سازی کارکرد سرویس راهکاری‌هایی هستند که برای همین منظور پیشنهاد شده‌اند.

ایده‌ی اصلی مجازی سازی توابع شبکه جداسازی تجهیزات فیزیکی شبکه از کارکردهایی می‌باشد که بر روی آن‌ها اجرا می‌شوند. به این معنی که یک کارکرد شبکه مانند دیوار آتش می‌تواند بر روی سرورهای HVS<sup>۱</sup> به عنوان یک نرم افزار ساده مستقر شود. با این روش یک سرویس می‌تواند با استفاده از کارکردهای مجازی شبکه‌ای که می‌توانند به صورت نرم افزاری پیاده سازی شده و روی یک یا تعدادی سرور استاندارد فیزیکی اجرا شوند، استقرار یابد. کارکردهای مجازی شبکه‌ای می‌توانند در مکان‌های مختلف بازماندنی یا نمونه سازی شوند بدون آنکه نیاز به خریداری و نصب تجهیز جدیدی باشد. [۱۲]

High Volume Server<sup>۱</sup>

## ۱-۱ تعریف صورت مساله

مساله‌ی جاسازی کارکردهای مجازی شبکه یکی از چالش‌های مهم در تخصیص منابع به زنجیره‌های کارکرد سرویس می‌باشد. مساله جاسازی کارکردهای مجازی شبکه به دو زیر مساله‌ی نگاشت گره‌های مجازی و نگاشت یال‌های تقسیم می‌شود که می‌بایست به صورت توأمان در نظر گرفته شوند. البته محدودیت‌های زیادی وجود دارد که باید هنگام نگاشت در نظر گرفته شود. منابع فیزیکی انتخاب شده از شبکه زیرساخت باید نیازمندی‌های کارکرد شبکه مجازی را تأمین 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، مجموعه‌ای از محدودیت‌ها وجود دارد که مختص زنجیره‌های کارکرد سرویس می‌باشد. یکی از این موارد وجود VNFM در این شبکه‌های می‌باشد که به علت اهمیت میزان تأخیر ارتباط بین کارکرد مجازی شبکه و VNFM می‌بایست در مکان مناسبی جایابی شود بنابراین زیرمساله‌ی جدیدی به مساله‌ی اصلی اضافه می‌شود.

## 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. امروزه هزینه‌ی زیادی صرف مانیتورینگ دیتاسنترها می‌شود و مانیتورینگ برای سرویس‌ها بسیار امر مهمی است. در بسیاری از موارد مانیتورینگ امری است که در آینده به آن فکر می‌شود و آسیب‌های زیادی در پی دارد. این پژوهش قصد دارد نیازمندی مانیتورینگ برای سرویس‌ها را در زمان نگاشت آن‌ها مدنظر قرار دهد تا از خسارت‌های نبود مانیتورینگ برای سرویس‌ها جلوگیری کند.

## 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 تأخیر اتصالات کارکرد مجازی شبکه و VNFM یک مرحله جایابی و نگاشت به مساله‌ی اصلی اضافه شده است. در ادامه محدودیت‌هایی برای اتصالات بین کارکردهای مجازی شبکه و VNFM‌ها در نظر گرفته شده است و فرض شده است برای مدیریت تعداد مشخصی از کارکردهای 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 نیازمندی‌هایی مانند پایداری و کیفیت بالا منجر به اتکای فراهم کنندگان سرویس بر سخت افزارهای اختصاصی می‌شود. این درحالی است که نیازمندی کاربران به سرویس‌های متنوع و عموماً با عمر کوتاه و نرخ بالای ترافیک افزایش یافته است. بنابراین فراهم کنندگان سرویس‌ها 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 می‌شود. با افزایش تجهیزات، پیدا کردن فضای فیزیکی برای استقرار تجهیزات جدید به مرور دشوارتر می‌شود. 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 سخت افزارها کوتاهتر میشود که مانع از ایجاد نوآوری در سرویس‌های شبکه می‌شود.

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 آن‌ها هدایت می‌شود. 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 سرویس‌دهی بهتر به کاربران هستیم که نیاز به جا به جایی کارکردها و تغییر جداول مسیریابی دارد. در روش سنتی این کار سخت و هزینه‌بر است که ممکن است خطاهای بسیاری در آن رخ دهد. از جنبه دیگر، تغییر سریع سرویس‌های 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

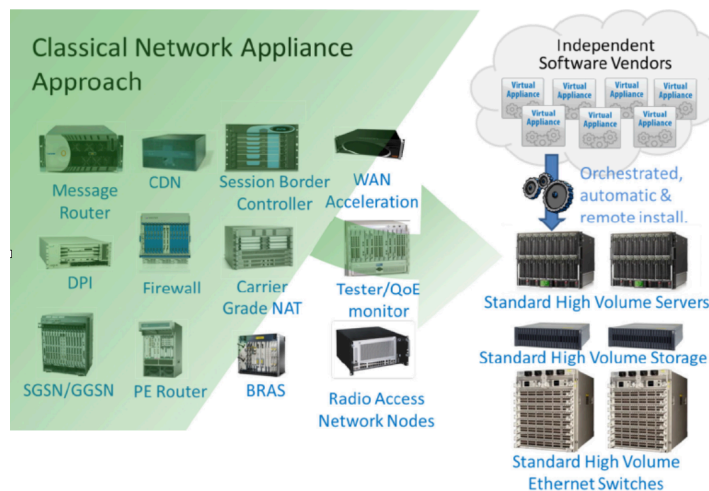
با استفاده از مجازی سازی کارکردهای شبکه و اجرای آن‌ها بر روی سرورهای استاندارد با توان بالا، امکان اجرای کارکردها بر روی سخت افزارهای عمومی را فراهم کرده است تا نیاز به تجهیزات سخت افزاری خاص منظوره کاهش یابد. از طرف دیگر SFC امکان تعریف زنجیره کارکردها را ارائه می‌کند که ایجاد و انتخاب مسیرهای متفاوت برای پردازش ترافیک به صورت پویا و بدون ایجاد تغییر در زیرساخت فیزیکی را امکان پذیر می‌کند با توجه به این فناوری‌ها، مسائل تحقیقاتی جدیدی مطرح شدند که از مهم ترین آن‌ها می‌توان تخصیص منابع بهینه به سرویس درخواستی کاربر را نام برد.

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

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

## ۲-۲ مجازی‌سازی کارکرد شبکه

مجازی‌سازی کارکرد شبکه اصل جداسازی کارکرد شبکه به وسیله انتزاع سخت‌افزاری مجازی از سخت‌افزاری است که بر روی آن اجرا می‌شود. هدف مجازی‌سازی کارکرد شبکه تغییر روش اپراتورهای شبکه در طراحی شبکه با تکامل مجازی‌سازی استاندارد فناوری اطلاعات به منظور تجمیع تجهیزات شبکه در سرورهای استاندارد، سوییچ‌ها و ذخیره‌سازها 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 می‌شود. ویژگی اصلی این سرورها این است که اجزای آن‌ها به راحتی از فروشندگان مختلف قابل خریداری و تعویض است. این تجهیزات می‌توانند در مراکز داده، گره‌های شبکه، یا مکان کاربران انتهایی قرار بگیرند. این روند در شکل ۱-۲ نیز توصیف شده است.



شکل ۱-۲: رویکرد NFV

با استفاده از NFV، انواع کارکردهای شبکه مانند دیواره آتش و NAT را می‌توان به صورت یک برنامه نرم‌افزاری از فروشندگان مختلف تهیه کرد و آن‌ها را بر روی سرورهای با توان بالا اجرا کرد که نیاز به نصب تجهیزات خاص منظوره و جدید را برطرف می‌سازد.

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 کوتاه‌کردن 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 کارکرد ها 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. 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

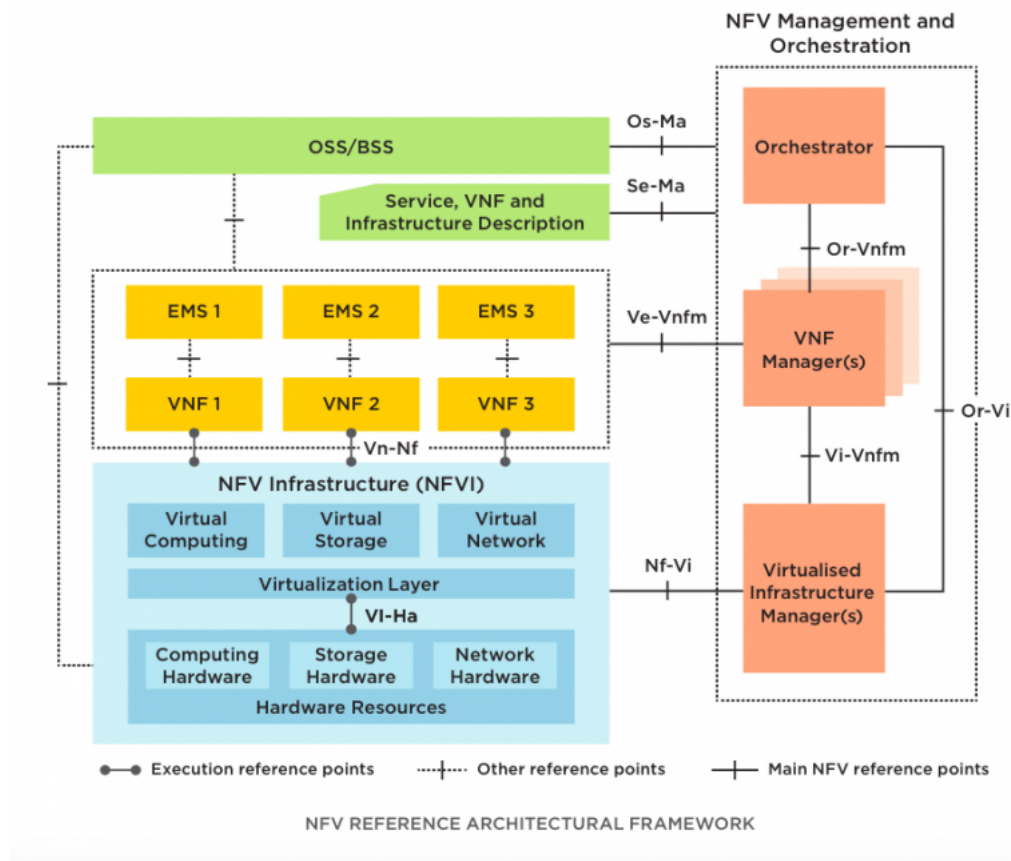
در این بخش مؤلفه های تشکیل دهنده معماری NFV شرح داده میشوند. هر یک از اجزای معماری میتوانند توسط تولیدکنندگان متفاوتی تأمین شوند و به وسیله واسطه هایی که توسط معماری NFV توصیف شده اند با یکدیگر در ارتباط باشند. بنابراین معماری NFV توصیف شده توسط ETSI راه حلی با قابلیت مشارکت و هماهنگی چندین تولیدکننده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

- 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.

### ۱-۳-۲ زیرساخت مجازی سازی کارکردهای شبکه یا NFVI

زیرساخت مجازی سازی کارکردهای شبکه ترکیبی از منابع نرم افزاری و سخت افزاری است که محیطی برای نصب کارکردهای مجازی شبکه فراهم می آورد. منابع سخت افزاری شامل منابع محاسباتی، ذخیره سازها و شبکه (شامل لینک ها و گره ها) هستند که پردازش، ذخیره سازی و ارتباط را برای کارکردهای مجازی شبکه فراهم می آورند. منابع مجازی انتزاعی از منابع شبکه ای، پردازشی و ذخیره سازی هستند. به وسیله انتزاع از طریق لایه ی مجازی سازی (بر پایه ی hypervisor) منابع سخت افزاری در اختیار کارکردهای مجازی قرار می گیرند که این منابع شامل منابع محاسباتی، شبکه ای و ذخیره سازی می باشند.

در مراکز داده ای ممکن است منابع پردازشی و ذخیره سازی تحت عنوان یک یا چند ماشین مجازی نمایش داده شوند در حالی که شبکه های مجازی از لینک ها و گره های مجازی تشکیل می شوند. شبکه های مجازی پیش از بحث مجازی سازی کارکردهای شبکه مدنظر بوده اند و روی آن ها کار شده است. در واقع از شبکه های مجازی در



شکل ۲-۲: معماری مجازی‌سازی کارکردهای شبکه

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.

## ۲-۳-۲ 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 ۳-۳-۲**

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

**OSS/BSS ۴-۳-۲**

این مولفه، ترکیبی از سایر بخش های عملکردهای اپراتور است که در چارچوب معماری NFV ارائه شده از طرف ETSI قرار نمیگیرند. به عنوان مثال می تواند شامل مدیریت سیستم های Legacy باشد.

**NFV MANO ۵-۳-۲**

بر اساس چهارچوب پیشنهادی ETSI وظیفه NFV MANO فراهم آوردن کارکردهای لازم برای تدارک و فرآیندهای مشابه مانند تنظیم کردن و ... کارکردهای مجازی شبکه است. NFV MANO شامل هماهنگ کننده و مدیریت کننده چرخه زندگی منابع سخت افزاری و نرم افزاری که مجازی سازی زیرساخت را پشتیبانی می کنند، است. هر زنجیره نیاز دارد که حداقل توسط یک VNFM مدیریت شود تا مثلا خطاهای آن را تحت نظر قرار دهد و در صورت نیاز در قسمت دیگری از شبکه استقرار یابد. مساله ای جایگذاری زنجیره ها بسیار مورد مطالعه قرار گرفته است، اما در این بین توجه لازم به نیاز این زنجیره ها به یک VNFM صورت نپذیرفته است.

## فصل سوم

### کارهای مرتبط

در [۶] 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 MASN 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 کارایی، 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 [۸] نویسندگان سه مرحله برای عملیات جایگذاری زنجیره‌های کارکرد سرویس معرفی می‌کنند: انتخاب، جایگذاری 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 [۱۴] نویسندگان برای اولین بار مساله‌ی Traffic Steering 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 [۹] نویسندگان مساله‌ی جایگذاری و مسیریابی زنجیره‌های کارکرد سرویس را به صورت توامان 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 [۵] 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 [۱۱] 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 می‌نیمم شود. این مقاله تغییر ترافیک توسط کارکردها را نیز مدنظر قرار داده است.

در [۱۰] مساله‌ی جایگذاری زنجیره‌های کارد سرویس با دو هدف کاهش مصرف انرژی و افزایش نرخ جریان پذیرفته شده مدل‌سازی می‌شود. این مدل‌سازی 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 فرمول‌بندی شده است.

در [۷] نویسندگان ابتدا مساله‌ی جایگذاری و مسیریابی VNFها را در اوج ترافیک حل می‌کنند. در ادامه آن‌ها فرض می‌کنند که ترافیک به صورت دوره‌ای-ثابت می‌باشد به این معنا که ترافیک در تعداد متناهی بازه‌ی زمانی تعریف شده و تکرار می‌شود. با این فرض در ادامه مقاله مساله‌ی دیگری مبنی بر مهاجرت نمونه‌ها با توجه به تغییر ترافیک را مطرح می‌کند. در این مهاجرت‌ها مقاله از توان مصرفی در مهاجرت صرف نظر کرده و تلاش می‌کند جریمه‌ای که بابت قطعی سرویس پرداخت می‌شود و توان مصرفی کل سیستم را بهینه کند.

در [۱۳] نویسندگان مساله‌ی توزیع بار در NFV را بررسی می‌کنند، آن‌ها در این مساله ویژگی‌های پایه‌ای NFV در کنار استفاده از روش ECMP مدنظر قرار می‌دهد. در روش ECMP بار بین مبدا و مقصد به صورت یکسان بین تمام مسیرها تقسیم می‌گردد. در این مساله تعدادی تقاضا در نظر گرفته می‌شود که کوتاهترین مسیرها بین مبدا و مقصد آن‌ها مشخص است و در نهایت بار در این مسیرها توزیع شده و کارکردها شبکه‌ای نیز در این مسیرها مستقر می‌شوند.

جدول ۳-۱: مقایسه مقالات پذیرش زنجیره‌های کارکرد سرویس

منبع	منابع	محدودیت	برخط	نگاشت	انتساب	اشتراک	تخصیص								
	تخصیص یافته	ظرفیت پردازشی نمونه	یا برون خط	کارکرد و لینک	کارکرد	نمونه	VNFM								
#	other	MEM	BW	CPU	دارد	ندارد	برخط	برون خط	کارکرد لینک	یک نمونه	چند نمونه	دارد	ندارد	دارد	ندارد
[۶]	—	—	—	✓	—	✓	—	✓	✓	✓	—	—	✓	—	✓
[۸]	—	—	—	✓	—	✓	—	✓	✓	—	✓	—	✓	—	✓
[۹]	—	—	—	✓	—	✓	—	✓	✓	—	✓	—	✓	—	✓
پژوهش حاضر	✓	✓	✓	✓	—	✓	—	✓	✓	✓	—	—	✓	—	✓

همانطور که در کارهای بیان شده دیده می‌شود، مساله‌ی تخصیص منابع مدیریتی در پذیرش زنجیره‌های کارکرد مورد بررسی قرار نگرفته است و در پژوهش حاضر قصد داریم این مورد را بررسی نماییم.



## فصل چهارم

### تعریف مساله

## ۴-۱ مساله

بیشینه کردن سود حاصل از پذیرفتن 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 پردازشی و پهنای باند 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<sup>۱</sup>ها<sup>۱</sup> 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.
- نوع کارکرد مجازی شبکه تعریف شده است که هر یک مقدار مشخصی از حافظه و توان پردازشی 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.
- VNFMها می‌توانند بین زنجیره به اشتراک گذاشته شوند.
- هر نمونه از VNFMها می‌تواند تعداد مشخصی از نمونه‌های کارکرد مجازی شبکه را سرویس دهد.
- برای ارتباط میان هر نمونه از VNFMها 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<sup>۲</sup> دارد.
- توپولوژی می‌تواند دارای تعداد گرهی ورودی<sup>۳</sup> و خروجی<sup>۴</sup> باشد.

NFVI Point of Presence<sup>۱</sup>  
 license<sup>۲</sup>  
 ingress<sup>۳</sup>  
 egress<sup>۴</sup>

- هر زنجیره می‌تواند دارای تعدادی نقطه‌ی ورودی و خروجی باشد که می‌بایست بر روی گره‌های ورودی و خروجی نگاشته شوند.

اگر جایگذاری VNFM ها 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 VNFM ها جمع‌آوری پیام‌های خطا می‌باشد، برای این امر نیاز است که پهنای باند کوچک اما اختصاصی به VNFM ها تخصیص داده شود بنابراین نمی‌توان جایگذاری آن‌ها را با روش‌های سابق و مانند سایر کارکردهای مجازی شبکه فرض کرد. از آنجایی که VNFM ها نیاز به مجوز دارند می‌توان با به اشتراک گذاشتن آن‌ها در هزینه‌های سیستم صرفه‌جویی کرد. در نظر گرفتن VNFM همراه با VNF ها مساله‌ی جدیدی است.

## 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 $k$
$mem\hat{o}ry$	required RAM of VNFM in GB
$c\hat{o}re$	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 $v$
$band\hat{w}idth$	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:*

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

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 VNFها 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 nodeهای 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 سرویس‌دهی VNFM این محدودیت براساس تعداد ماشین‌های محازی که هر VNFM سرویس می‌دهد تعیین شده است. در نظر داشته باشید که ممکن است برخی از انواع VNFها 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 نمونه‌های VNF را نداشته باشد نباید نمونه‌ای 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 نمی‌توانند توسط سرورهای مشخصی مدیریت شوند. این ویژگی به ادمین شبکه امکان مدیریت بیشتری می‌دهد و او می‌تواند با دست باز تمامی سیاست‌های مورد نظرش را اعمال نماید.

*Manager to node support constraint*

$$1 - z_{vw_1}^k + \bar{z}_{hw_2} = 0 \quad \forall w_1 \in V_s^{PN} \forall w_2 \in V_s^{PN} notManagableBy(w_1, w_2) = 1 \\ \forall h \in [1, \dots, T], \forall v \in V_{h,F}^{SFC}, \forall k \in [1, \dots, T] \quad (4-10)$$

$\tau_{ij}^{(u,v)}$	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 می‌کند.

*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 می‌کند.

*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 می‌کند که زمان سرویس‌دهی توسط VNFM‌ها 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

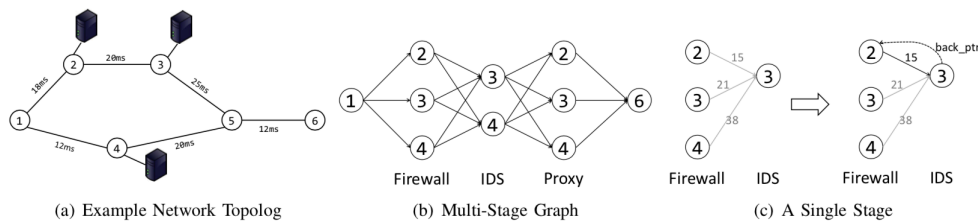
### راه حل پیشنهادی



مساله‌ی بیان شده به صورت ILP مدل‌سازی می‌شود. در [۶] 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 راه‌حل [۴] 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 مساله‌ی 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.



شکل ۵-۱: مدل‌سازی با گراف چندگامی [۴]

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 قرارگرفتن 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. به این ترتیب برای زنجیره‌هایی که سود بیشتری دارند منابع بیشتری در اختیار الگوریتم قرار دارد.

## فصل ششم

## ارزیابی

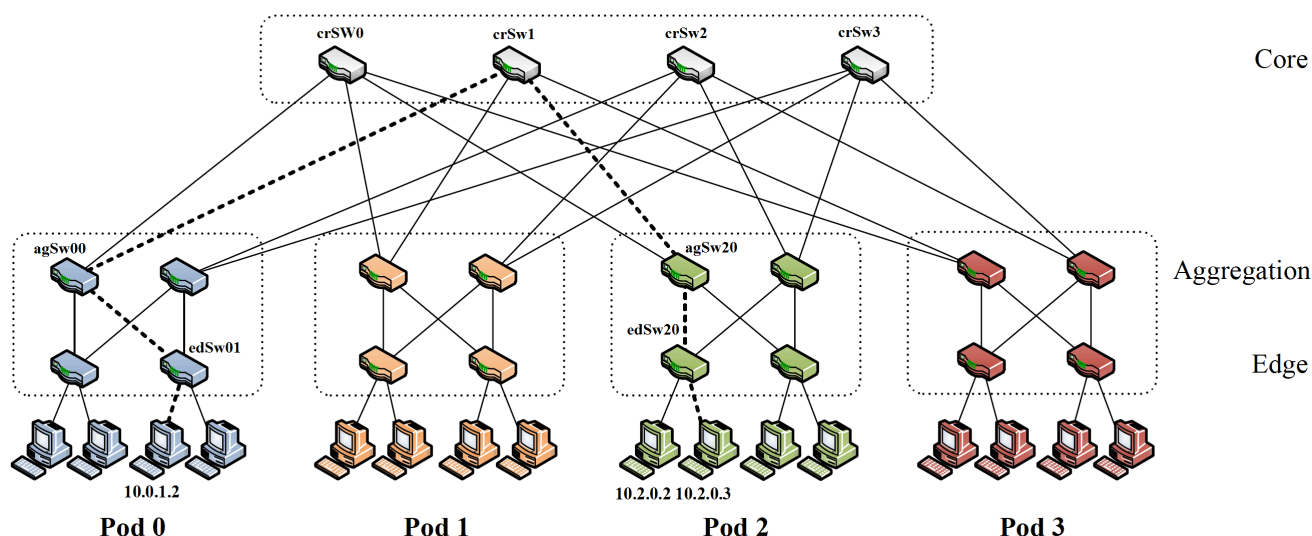
در این مساله هدف بیشینه کردن سود حاصل از پذیرش تقاضاهای زنجیره‌ی کارکرد سرویس می‌باشد که به این ترتیب معیار مقایسه نیز همین پارامتر خواهد بود. این پارامتر در ارزیابی با سایر مقالات مقایسه می‌شود ولی باید در نظر داشت که نیازمندی‌های مدیریتی که در این پژوهش مدنظر است در سایر پژوهش‌ها مدنظر نبوده است. راه‌حل پیشنهادی بهینه نبوده و به همین علت کارایی آن در سناریوهایی با حل بهینه مقایسه می‌شود. سایر پارامترهایی چون تعداد زنجیره‌های پذیرفته شده و ... نیز در این پژوهش ارزیابی می‌گردند.

## ۱-۶ مقدمه

همانطور که پیشتر بیان شد مساله‌ی اصلی راه‌حل چندجمله‌ای ندارد. این مساله با استفاده از چهارچوب CPLEX و با زبان جاوا توسعه یافته است. چهارچوب CLPEX توسط شرکت IBM توسعه پیدا کرده است و برای حل مسائل خطی استفاده می‌گردد. این چهارچوب به صورت کلی برای حل مسائل ILP از روش B&C استفاده می‌کند. پیاده‌سازی فرمول‌بندی این مساله در این چهارچوب در پیوست آمده است.

## ۲-۶ محیط ارزیابی

به صورت کلی در تمامی ارزیابی‌های این رساله از دو توپولوژی FatTree و USnet استفاده شده است. توپولوژی FatTree یک توپولوژی سازمان‌یافته است که در ادامه ساختار آن را می‌بینید.



شکل ۱-۶: توپولوژی ساختاریافته FatTree

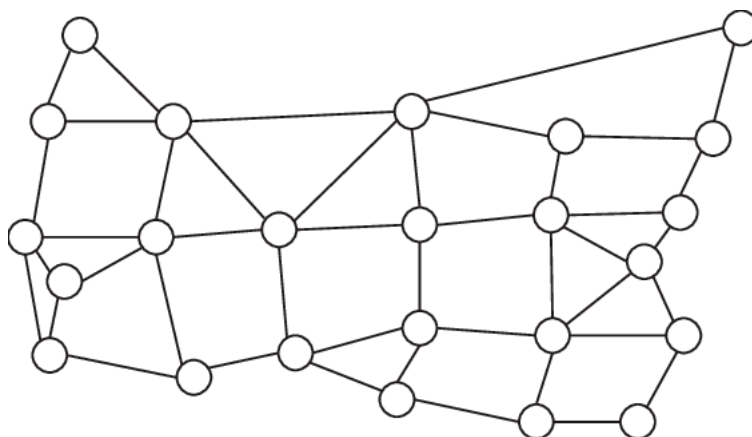
توپولوژی FatTree با مقدار  $k$  یک توپولوژی ۳ لایه (هسته، تجمعی و لبه) می‌باشد که:

- هر غلاف از  $(k/2)^2$  سرور و ۲ لایه  $k/2$  تایی سوئیچ  $k$  پورت تشکیل شده است.
- هر سوئیچ لبه به  $k/2$  سرور و  $k/2$  سوئیچ تجمعی متصل است.
- هر سوئیچ تجمعی به  $k/2$  سوئیچ لبه و  $k/2$  سوئیچ هسته متصل است.

•  $(k/2)^2$  سوئیچ هسته که هر کدام به  $k$  غلاف متصل هستند.

• سوئیچ‌های هسته گره‌های ورودی و خروجی این توپولوژی هستند.

توپولوژی USnet یک توپولوژی تصادفی می‌باشد که از ۲۴ نود و ۴۳ لینک تشکیل شده است. در پیاده‌سازی فرض شده است که همه‌ی ۲۴ نود سرور هستند و می‌توانند به عنوان گره‌ی ورودی و خروجی اعمال نقش کنند. این توپولوژی ساختاریافته نبوده و می‌توان آن را تصادفی فرض کرد.



شکل ۶-۲: توپولوژی تصادفی USnet

### ۳-۶ معیارهای ارزیابی

همانطور که پیشتر بیان شد معیار اصلی ارزیابی سود حاصل از جایگذاری زنجیره‌ها می‌باشد. پارامترهای زیادی در مساله موثر هستند که در این قسمت به مرور آن‌ها می‌پردازیم.

#### ۱-۳-۶ نسبت سود به هزینه

یکی از ویژگی‌های مهم مساله‌ای طرح شده در نظر گرفتن نیازمندی‌های مدیریتی است. یکی از این نیازمندی‌ها که در تابع هدف هم وجود دارد نیاز به تهیه گواهی برای هر VNFM است. این گواهی هزینه‌ای در بردارد و نیاز است که از آن به درستی استفاده شود و تاجایی که امکان دارد VNFM با ظرفیت خالی نداشت. برای اینکه تخمین درستی از این پارامتر داشته باشیم و بتوانیم از آن در ارزیابی‌های پیشرو استفاده کنیم، موارد زیر را تعریف می‌کنیم:

• هزینه سرشکن شده گواهی برای هر نمونه = ظرفیت / قیمت گواهی

• قیمت سرشکن شده برای هر نمونه = طول زنجیره / قیمت زنجیره

• سود نمونه = هزینه سرشکن شده گواهی برای هر نمونه - قیمت سرشکن شده برای هر نمونه

در نهایت یکی از پارامترهایی که برای ارزیابی راه‌حل پیشنهادی وجود دارد نسبت سود نمونه به هزینه سرشکن شده گواهی برای هر نمونه می‌باشد. این پارامتر در واقع باعث می‌شود مساله‌ی پیشنهادی آسانتر یا سخت‌تر شود. در زمانی که این نسبت عددی کوچک است استفاده نادرست از گواهی‌ها ضرر زیادی می‌زند و شاید بهتر باشد

زنجیره‌های کمتری پذیرفته شوند که این امر باعث سختی مساله می‌شود. در حالتی که این نسبت عدد بزرگی باشد می‌توان از این هزینه‌ها صرف‌نظر کرده و تنها منابع مصرفی اجزای مدیریتی مدنظر خواهند بود که مساله ساده‌تر می‌شود. در ادامه از این پارامتر تحت عنوان نسبت سود به هزینه یاد می‌کنیم.

#### ۲-۳-۶ سود

سود، اختلاف میان مجموع قیمت زنجیره‌های پذیرفته شده و هزینه‌هایی است که برای گواهی‌ها پرداخت شده است. سود دقیقاً همان تابع هدف مساله است که ارزیابی بر اساس آن صورت می‌گیرد. قیمت زنجیره‌ها پیش از جایگذاری آن‌ها مشخص شده است و فرض می‌کنیم این قیمت با تعداد نمونه‌های داخل زنجیره نسبت مستقیم دارد.

#### ۳-۳-۶ تعداد زنجیره‌های پذیرفته شده

تعداد زنجیره‌هایی است که جایگذاری آن‌ها با موفقیت انجام شده و برای آن‌ها منابع مدیریت نیز تخصیص داده شده است. این معیار در زمانی که پارامتر نسبت سود به هزینه پایین باشد نمود خوبی از عملکرد الگوریتم نمی‌باشد.

#### ۴-۳-۶ تعداد VNFM‌های استفاده شده

تعداد VNFM‌هایی که برای مدیریت زنجیره‌ها تخصیص داده می‌شوند نمایش دهنده‌ی تعداد گواهی‌های استفاده شده است. این معیار در زمانی که پارامتر نسبت سود به هزینه بالا باشد نمود خوبی از عملکرد الگوریتم نمی‌باشد.

### ۴-۶ محیط ارزیابی

برای ارزیابی از زنجیره‌های تصادفی استفاده می‌شود و هر نمونه از ارزیابی میانگین ۱۰ اجرا می‌باشد. برای تولید زنجیره‌های تصادفی از ابزاری استفاده می‌شود که برای همین پژوهش توسعه یافته است و زنجیره‌های خطی با طول تصادفی تولید می‌کند. نمونه‌های داخل زنجیره‌ها دارای نوع می‌باشند که به صورت تصادفی از لیست زیر انتخاب می‌شوند:

types:

- name: ingress
  - cores: 0
  - ram: 0
  - ingress: true
  - manageable: false
- name: egress
  - cores: 0
  - ram: 0
  - egress: true

```

    manageable: false
- name: vFW
  cores: 2
  ram: 2
  manageable: true
- name: vNAT
  cores: 2
  ram: 4
  manageable: true
- name: vIDS
  cores: 2
  ram: 2
  manageable: true
- name: vDPI
  cores: 2
  ram: 4
  manageable: true

```

زنجیره‌های تولید شده دارای گرهی آغازی و پایانی می‌باشند. تنظیمات زیر برای VNFها در نظر گرفته شده است.

```

ram: 4
cores: 2
capacity: 10
radius: 100
bandwidth: 1
licenseFee: 100

```

تمامی ارزیابی‌ها روی سیستمی با مشخصات زیر انجام شده‌اند:

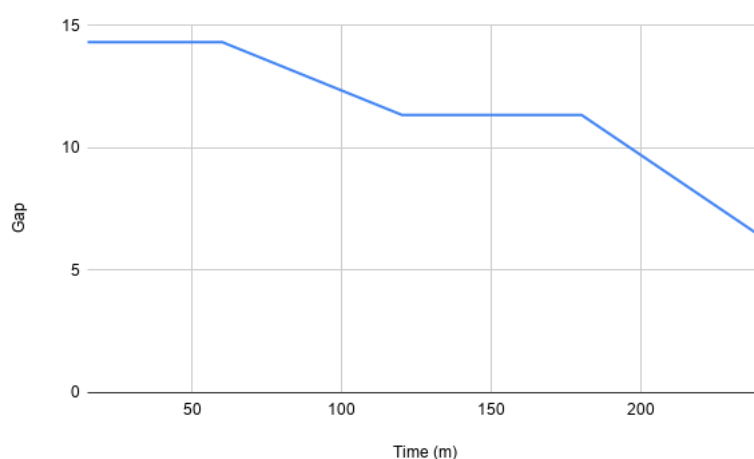
- AMD Ryzen Threadripper 1950X 16-Core Processor
- 22 GB of RAM
- 100 GB of non-SSD Storage

در نهایت برای بازتولید نتایج تمامی کدها و تنظیمات در [۳] موجود است.

## ۵-۶ نتایج ارزیابی

### ۱-۵-۶ زمان حل بهینه

با استفاده از ۱۳۰ زنجیره‌ی تصادفی که طولی بین ۳ تا ۷ دارند و توپولوژی FatTree با مقدار  $k$  برابر ۸ قصد داریم زمان حل راه حل بهینه و گپ<sup>۱</sup> آن را ارزیابی کنیم. برای این ارزیابی نسب سود به هزینه برابر ۹ فرض شده است.



شکل ۳-۶: زمان حل الگوریتم بهینه

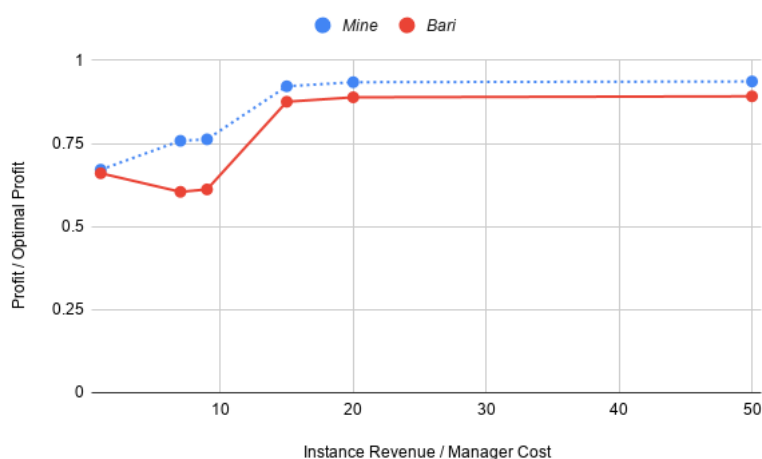
گپ برای ۱۰۰ زنجیره در ۱۵ دقیقه با شرایط فوق برابر با ۴ درصد می‌باشد بنابراین در سایر ارزیابی‌ها الگوریتم بهینه را تا ۱۵ دقیقه محدود کرده و تعداد زنجیره‌ها را از ۱۰۰ افزایش نمی‌دهیم. همانطور که در نمودار ۳-۶ مشاهده می‌شود زمان حل مساله‌ی بهینه برای ۱۳۰ زنجیره نسبت به ۱۰۰ زنجیره جهش بزرگی داشته و بعد از ۴ ساعت ما به گپ زیر ۱۰ درصد می‌رسیم. به این ترتیب استفاده از راه حل بهینه ممکن است زمان بر باشد و نیاز به پیاده‌سازی یک راه حل مکاشفه‌ای می‌باشد.

### ۲-۵-۶ نسبت سود به هزینه

در ادامه راه حل پیشنهادی و راه حل [۴] را با نسبت‌های مختلف سود به هزینه مورد آزمون قرار می‌دهیم. در این آزمون‌ها از ۱۰۰ زنجیره با طول‌های تصادفی ۳ تا ۷ استفاده می‌کنیم. توپولوژی مورد استفاده FatTree با مقدار  $k$  برابر ۸ می‌باشد. در این آزمایش‌ها نسبت سود حاصل از هر الگوریتم به الگوریتم بهینه سنجیده شده و در نمودار آمده است. در نظر داشته باشید که این نسبت به صورت عددی بین ۰ تا ۱ گزارش شده است. مساله بهینه با زمان ۱۵ دقیقه محدود شده است.

همانطور که در نمودار ۴-۶ دیده می‌شود الگوریتم پیشنهادی بهتر از الگوریتم [۴] عمل می‌کند. این امر زمانی که نسبت سود به هزینه بزرگتر است بیشتر دیده می‌شود. در ادامه برای تمامی ارزیابی‌ها از نسبت سود به هزینه ۹ استفاده می‌کنیم که هم از نظر فنی عدد معقولی بوده و تاثیر در نظر گرفتن هزینه گواهی را از بین نمی‌برد.

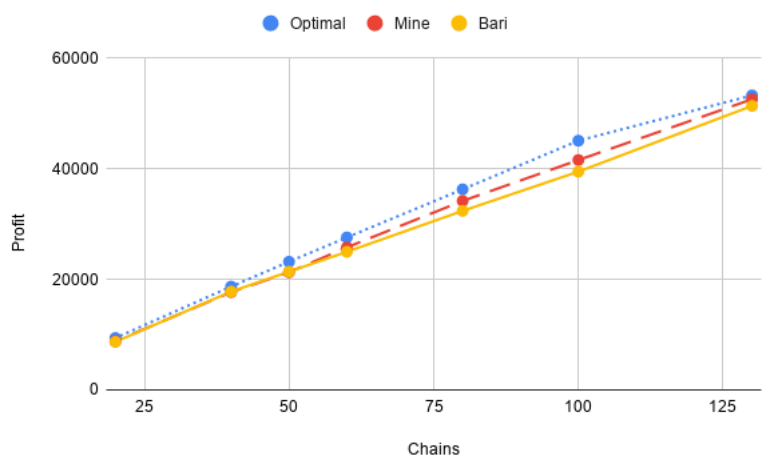
<sup>۱</sup> Optimality Gap



شکل ۴-۶: کارایی الگوریتم پیشنهادی و [۴] در نسبت‌های مختلف سود به هزینه

### ۳-۵-۶ زنجیره‌ها در توپولوژی FatTree

در تمامی این ارزیابی‌ها از نسبت سود به هزینه ۹ استفاده کرده و زنجیره‌ها را در توپولوژی FatTree جایگذاری می‌کنیم. در این ارزیابی تعداد زنجیره‌ها را تغییر می‌دهیم اما همواره طول زنجیره‌ها بین ۳ تا ۷ می‌باشد. همانطور که بیان شد الگوریتم بهینه برای تمامی حالت‌ها تا ۱۵ دقیقه محدود شده است، برای حالت ۱۳۰ برای رسیدن به گپ معقول نیاز به ۴ ساعت زمان است.

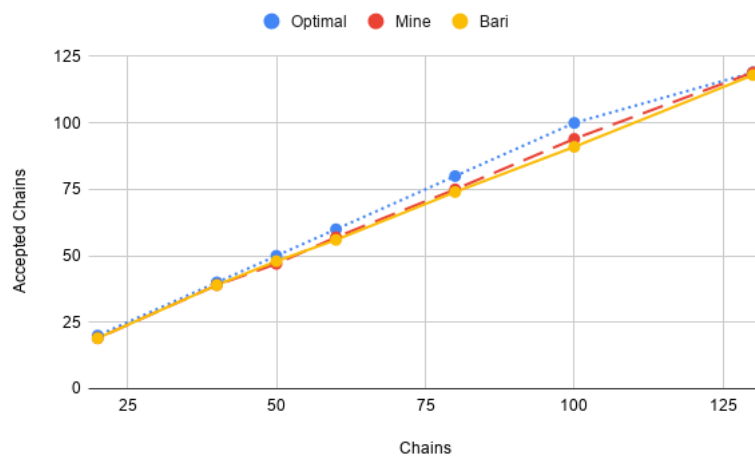


شکل ۵-۶: سود نهایی الگوریتم‌های بهینه، پیشنهادی و [۴]

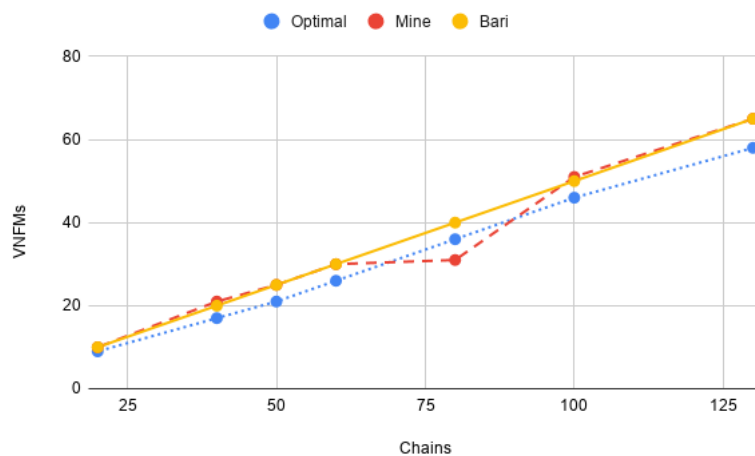
همانطور که در نمودار ۵-۶ مشخص است با افزایش تعداد زنجیره‌ها الگوریتم [۴] از الگوریتم پیشنهادی بدتر عمل می‌کند، به این ترتیب که سود حاصل از پذیرفتن زنجیره‌ها در الگوریتم پیشنهادی بیشتر است. یکی از موارد مهم در زمانی که ۱۳۰ زنجیره وجود دارد نزدیکی جواب بهینه به جواب الگوریتم پیشنهادی است. در این حالت به علت پیچیدگی مساله همانطور که صحبت شد تولید جواب با گپ مناسب زمان زیادی می‌برد، بنابراین جوابی که در این حالت استفاده شده است نسبت به سایر نقاط ۲ درصد گپ بیشتری دارد.

نمودارهای ۶-۶ و ۷-۶ بیشتر جنبه‌ی اطلاعی دارند و تعداد زنجیره‌های پذیرفته شده و تعداد VNFMs





شکل ۶-۶: تعداد زنجیره‌های پذیرفته شده الگوریتم‌های بهینه، پیشنهادی و [۴]

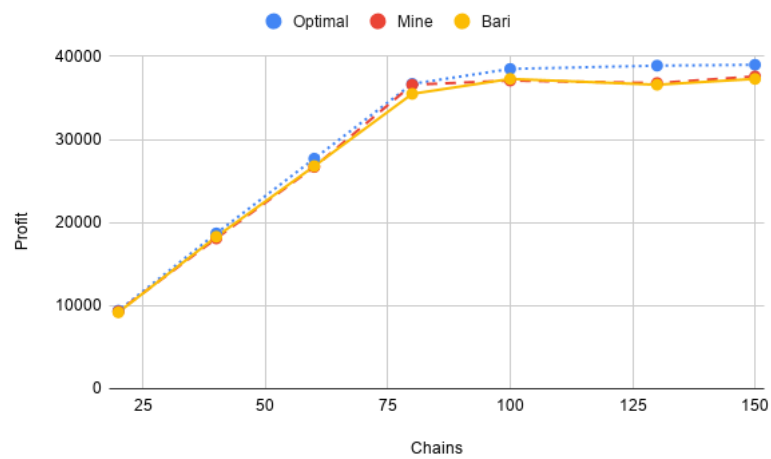


شکل ۶-۷: تعداد VNFM's الگوریتم‌های بهینه، پیشنهادی و [۴]

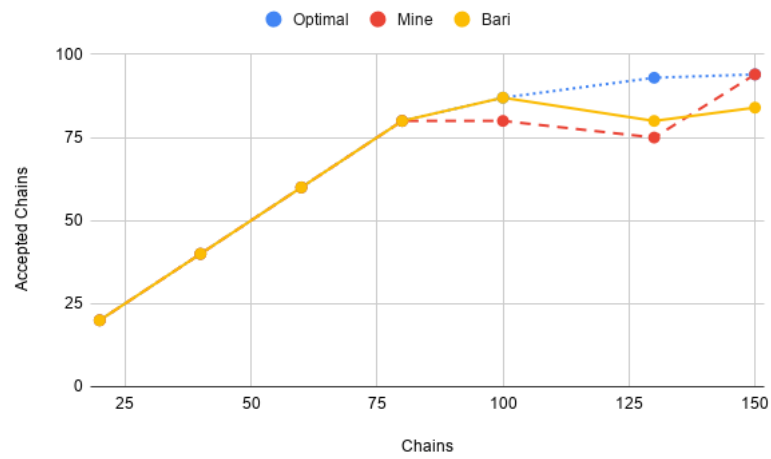
استفاده شده را نشان می‌دهند. همانطور که در تعریف مساله نیست گفته شده است، این دو پارامتر در سود نهایی تاثیر دارند اما سود نهایی به ضرایب آن‌ها نیز وابسته است.

#### ۴-۵-۶ زنجیره‌ها در توپولوژی USnet

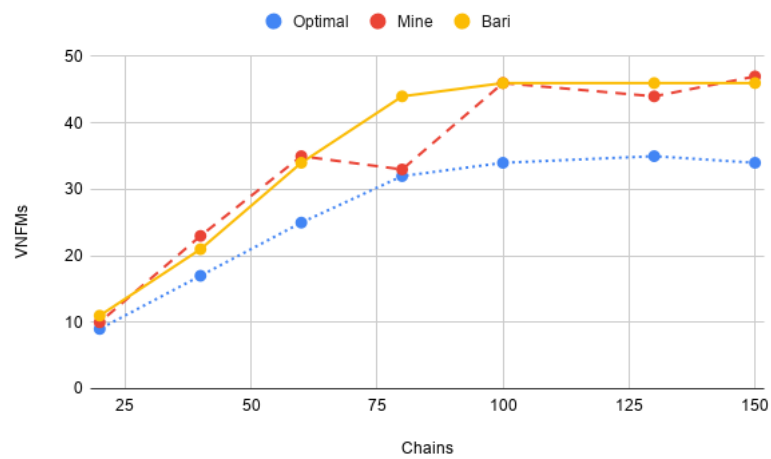
در تمامی این ارزیابی‌ها از نسبت سود به هزینه ۹ استفاده کرده و زنجیره‌ها را در توپولوژی USnet جایگذاری می‌کنیم. در این ارزیابی‌ها تعداد زنجیره‌ها را تغییر می‌دهیم اما همواره طول زنجیره‌ها بین ۳ تا ۷ می‌باشد. همانطور که بیان شد این توپولوژی نزدیک به حالت تصادفی می‌باشد. از آنجایی که تعداد لینک‌ها و نودهای این توپولوژی کم می‌باشد الگوریتم‌های پیشنهادی و [۴] هر دو مشابه یکدیگر عمل می‌کنند.



شکل ۶-۸: سود نهایی الگوریتم‌های بهینه، پیشنهادی و [۴]



شکل ۶-۹: تعداد زنجیره‌های پذیرفته شده الگوریتم‌های بهینه، پیشنهادی و [۴]



شکل ۶-۱۰: تعداد VNFMs الگوریتم‌های بهینه، پیشنهادی و [۴]

## 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] Alvani, Parham. The road to master of science degree, 2019.
- [4] 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.
- [5] 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.
- [6] 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.
- [7] 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.

- 
- [8] 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.
- [9] 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.
- [10] 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.
- [11] 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.
- [12] 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.
- [13] 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.
- [14] 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.



**Amirkabir University of Technology  
(Tehran Polytechnic)**

**Department of Computer Engineering & Information  
Technology**

**MSc Thesis**

**Virtualized Network Service Function  
Chaining Subject to Management  
Resource Constraint**

**By**

**Parham Alvani**

**Supervisor**

**Prof. Bahador Bakhshi**

**September 2019**