

دانشگاه تهران
پردیس دانشکده‌های فنی
دانشکده مهندسی برق و کامپیوتر
گروه شبکه



تخصیص منابع در شبکه‌های دسترسی رادیویی باز با برش دهی شبکه

پروپزال برای دکتری در رشته مهندسی برق
گرایش مخابرات سیستم

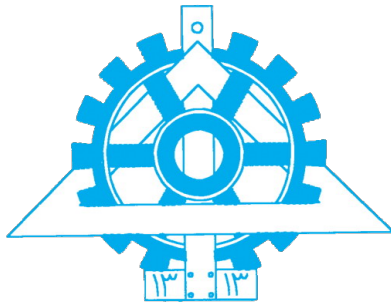
مژده کربلایی مطلب

استاد راهنما

دکتر شاه منصوری

مهر ۱۳۹۹





دانشگاه تهران
پردیس دانشکده‌های فنی
دانشکده مهندسی برق و کامپیوتر
گروه شبکه



تخصیص منابع در شبکه‌های دسترسی رادیویی باز با برش دهی شبکه

پروپزال برای دکتری در رشته مهندسی برق
گرایش مخابرات سیستم

مژده کربلایی مطلب

استاد راهنما

دکتر شاه منصوری

مهر ۱۳۹۹



دانشگاه تهران
پردیس دانشکده‌های فنی
دانشکده مهندسی برق و کامپیوتر



گواهی دفاع از پروپزال دکتری

هیأت داوران پروپزال دکتری آقای / خانم مژده کربلایی مطلب به شماره دانشجویی ۸۱۰۱۹۶۰۷۴ در رشته مهندسی برق - گرایش مخابرات سیستم را در تاریخ با عنوان «تخصیص منابع در شبکه‌های دسترسی رادیویی باز با برش‌دهی شبکه»

به عدد	به حروف
<input type="text"/>	<input type="text"/>

با نمره نهایی

و درجه

ارزیابی کرد.

ردیف	مشخصات هیأت داوران	نام و نام خانوادگی	مرتبه دانشگاهی	دانشگاه یا مؤسسه	امضا
۱	استاد راهنما	دکتر شاه منصوری	دانشیار	دانشگاه تهران	
۲	استاد داور داخلی	دکتر داور داخلی	دانشیار	دانشگاه تهران	
۳	استاد مدعو	دکتر داور خارجی	دانشیار	دانشگاه داور خارجی	
۴	نماینده تحصیلات تکمیلی دانشکده	دکتر نماینده	دانشیار	دانشگاه تهران	

نام و نام خانوادگی معاون آموزشی و تحصیلات

تکمیلی پردیس دانشکده‌های فنی:

تاریخ و امضا:

نام و نام خانوادگی معاون تحصیلات تکمیلی و

پژوهشی دانشکده / گروه:

تاریخ و امضا:

تعهدنامه اصالت اثر

باسمه تعالی

اینجانب مؤده کربلایی مطلب تأیید می‌کنم که مطالب مندرج در این پروپزال حاصل کار پژوهشی اینجانب است و به دستاوردهای پژوهشی دیگران که در این نوشته از آن‌ها استفاده شده است مطابق مقررات ارجاع گردیده است. این پروپزال قبلاً برای احراز هیچ مدرک هم‌سطح یا بالاتری ارائه نشده است.

نام و نام خانوادگی دانشجو: مؤده کربلایی مطلب
تاریخ و امضای دانشجو:

کلیه حقوق مادی و معنوی این اثر
متعلق به دانشگاه تهران است.

تقديم به:

پدر و مادرم

قدردانی

سپاس خداوندگار حکیم را که با لطف بی کران خود، آدمی را به زیور عقل آراست.
در آغاز وظیفه خود می دانم از زحمات بی دریغ اساتید راهنمای خود، جناب آقای دکتر ... و ...، صمیمانه تشکر و قدردانی کنم که در طول انجام این پایان نامه با نهایت صبوری همواره راهنما و مشوق من بودند و قطعاً بدون راهنمایی های ارزنده ایشان، این مجموعه به انجام نمی رسید.
از جناب آقای دکتر ... که زحمت مشاوره، بازبینی و تصحیح این پایان نامه را تقبل فرمودند کمال امتنان را دارم.

با سپاس بی دریغ خدمت دوستان گرانمایه ام، خانم ها ... و آقایان ... در آزمایشگاه ...، که با همفکری مرا صمیمانه و مشفقانه یاری داده اند.

و در پایان، بوسه می زنم بر دستان خداوندگاران مهر و مهربانی، پدر و مادر عزیزم و بعد از خدا، ستایش می کنم وجود مقدس شان را و تشکر می کنم از خانواده عزیزم به پاس عاطفه سرشار و گرمای امیدبخش وجودشان، که بهترین پشتیبان من بودند.

مژده کربلایی مطلب

مهر ۱۳۹۹

چکیده

در این پروپزال، ساختار رادیویی دسترسی باز (ORAN) در نسل پنجم معرفی می‌شود و تخصیص منابع در آن در نظر گرفته می‌شود. شبکه دسترسی رادیویی باز از ترکیب C-RAN و xRAN بدست آمده‌است. معماری ORAN برای ایجاد زیرساخت‌های RAN نسل بعدی طراحی شده است. معماری ORAN با تکیه بر اصول هوشمندی و باز بودن، پایه و اساس ساخت RAN مجازی بر روی سخت افزار آزاد، با کنترل رادیویی ایجاد شده توسط هوش مصنوعی است که توسط اپراتورهای سراسر جهان پیش بینی شده است. ORAN، المانهای شبکه ی دسترسی رادیویی را مجازی می‌کند، آنها را جدا کرده و رابط‌های باز مناسب را برای اتصال این عناصر تعیین می‌کند. همچنین، ORAN از روش‌های یادگیری ماشین برای هوشمندسازی لایه‌های RAN استفاده می‌نماید.

در اینجا، مسئله‌ی برش شبکه در بخش رادیویی و قراردگیری توابع مجازی شبکه بر روی مراکز داده باهم در شبکه‌ی دسترسی رادیویی باز مورد بررسی قرار گرفته است. بخش رادیویی مدل سازی شده و تاخیر و نرخ و پارامترهای دیگر بدست می‌آید. در این شبکه سرویس‌های مختلف در نظر گرفته شده که شامل تعدادی کاربر است که تقاضای استفاده از آن سرویس را دارد. همچنین تعدادی برش شبکه فرض شده است که شامل منابع فیزیکی، واجد رادیویی و واحد توزیع شده و مرکزی می‌باشد. واحد توزیع شده و مرکزی نیز شامل توابع شبکه‌ی مجازی هستند که پردازشها را انجام می‌دهند. فرض براین است که کاربران بر اساس سرویس مورد نیاز، دسته بندی می‌شوند و هدف تخصیص برش‌های شبکه به سرویس‌هاست و سپس تخصیص منابع فیزیکی محاسباتی به این برش‌های اختصاص یافته به سرویس‌ها می‌باشد.

برای حل این مسئله، ابتدا مسئله را به دو مسئله‌ی کوچکتر مختلف شکسته که در بخش اول، تخصیص برش شبکه به کاربران سرویس‌ها و تخصیص توان در ساختار رادیویی باز حل شده و پس از آن، برش‌هایی از شبکه که به سرویس اختصاص داده شده را به مراکز داده نگاشت می‌دهیم. در این مسئله، تاخیر و نرخ هر کاربر در سرویس مورد بررسی قرار گرفته شده و چالش تخصیص منابع که شامل برش بخش رادیویی به هر سرویس است و جاگیری توابع شبکه حل می‌شود. جواب بهینه با استفاده از نرم‌افزار MOSEK و CVX در MATLAB بدست می‌آید. همچنین روش ابتکاری، برای حالت متمرکز، در نظر گرفته شده است که مسئله‌ی اول شامل مسئله‌ی بسته‌بندی جعبه و تخصیص توان است که چون یک مسئله‌ی NP-Hard می‌باشد در دو بخش به صورت تکراری برای تخصیص سرویس به برش و بدست آوردن توان حل می‌شود که بخش تخصیص توان به یک مسئله‌ی محدب تبدیل می‌شود و مسئله‌ی دوم نیز یک مسئله‌ی سه بعدی بسته‌بندی جعبه است که حل دو بخش بسته‌بندی جعبه،

بر اساس مرتب کردن بسته‌ها به ترتیب با استفاده از اندازه‌گیری بر مبنای پارامترهای آن، بدست می‌آید. سپس مسئله به صورت ساده‌تر به دو مسئله‌ی بسته‌بندی جعبه و کوله‌پشتی نوشته شده و برای حالت دینامیکی متغیر با زمان با روش یادگیری تقویتی حل می‌شود.

واژگان کلیدی تخصیص برش شبکه، شبکه‌ی دسترسی رادیویی باز، توابع مجازی شبکه

فهرست مطالب

ث	فهرست تصاویر
چ	فهرست جداول
ح	فهرست الگوریتم‌ها
ح	فهرست برنامه‌ها
خ	فهرست اختصارات
۱	فصل ۱: مقدمه
۱	۱.۱ مقدمه ای بر 5G
۴	۱.۱.۱ نسل چهارم مخابرات
۴	۲.۱.۱ نسل پنجم مخابرات
۵	۲.۱ مقدمه ای بر ساختار ORAN
۶	۱.۲.۱ مقدمه ای بر ساختار شبکه‌های دسترسی رادیویی C-RAN
۷	۱.۱.۲.۱ ساختار شبکه‌های مختلف
۸	۲.۱.۲.۱ ساختار سنتی ایستگاه پایه
۸	۳.۱.۲.۱ ساختار ایستگاه پایه و واحد رادیویی
۹	۴.۱.۲.۱ ساختار C-RAN
۱۴	۲.۲.۱ xRAN
۱۵	۳.۲.۱ vRAN

۱۶	۴.۲.۱	ORAN	
۲۰	۳.۱	مجازی سازی توابع شبکه	
۲۳	۴.۱	زیرساخت تعریف شده توسط نرم افزار	
۲۳	۱.۴.۱	شبکه تعریف شده نرم افزار (SDN)	
۲۵	۲.۴.۱	شبکه دسترسی رادیویی تعریف شده نرم افزار (SDRAN)	
۲۶	۵.۱	برش شبکه	
۲۷	۶.۱	مسئله‌ی کوله‌پشتی و بسته‌بندی جعبه	
۲۸	۱.۶.۱	مسئله‌ی کوله‌پشتی	
۲۸	۲.۶.۱	مسئله‌ی بسته‌بندی جعبه	
۲۹	۷.۱	دستاوردهای پروژه	
۲۹	۸.۱	ساختار پروژه	
۳۰	۹.۱	نتیجه گیری	
۳۱	فصل ۲: مروری بر کارهای پیشین		
۳۱	۱.۲	مقدمه	
۳۱	۲.۲	مروری بر مسائل پیشین	
۳۲	۱.۲.۲	برش شبکه	
۳۵	۲.۲.۲	شبکه های دسترسی رادیویی باز	
۳۶	۳.۲.۲	قرار دادن VNF ها	
۳۷	۳.۲	روش های حل	
۳۷	۱.۳.۲	مسئله‌ی کوله‌پشتی و بسته‌بندی جعبه	
۳۸	۱.۱.۳.۲	مسئله‌ی کوله‌پشتی	
۳۸	۲.۱.۳.۲	مسئله‌ی بسته‌بندی جعبه	
۳۹	۲.۳.۲	روشهای یادگیری تقویتی	
۴۱	۴.۲	نتیجه گیری	
۴۲	فصل ۳: تخصیص منابع در شبکه‌های دسترسی رادیویی باز		

۴۲	مقدمه	۱.۳
۴۴	مدل سیستم	۲.۳
۴۴	نرخ قابل دسترس	۱.۲.۳
۴۷	میانگین تاخیر	۲.۲.۳
۴۸	مرکز داده ی فیزیکی	۳.۲.۳
۴۹	صورت مساله	۴.۲.۳
۵۱	روش ابتکاری استفاده شده	۳.۳
۵۱	بخش اول مسئله ی اول	۱.۳.۳
۵۲	بخش دوم مسئله ی اول	۲.۳.۳
۵۴	حل دو بخش مسئله ی اول به صورت تکراری	۳.۳.۳
۵۵	حل مسئله ی دوم	۴.۳.۳
۵۵	نتایج عددی	۴.۳
۶۱	نتیجه گیری	۵.۳

فصل ۴: تخصیص برش شبکه به صورت دینامیکی

۶۳	مقدمه	۱.۴
۶۳	مدل سیستم و صورت مسئله ی بخش رادیویی	۲.۴
۶۵	مدل سیستم و صورت مسئله ی بخش هسته	۳.۴
۶۶	حل مسئله به روش یادگیری تقویتی	۴.۴
۶۸	نتایج عددی مسئله ی اول	۱.۴.۴
۶۹	نتایج عددی مسئله ی دوم	۲.۴.۴
۷۲	نتیجه گیری	۵.۴

فصل ۵: پیشنهادات و کارهای آتی

۷۳	مقدمه	۱.۵
۷۳	نتیجه گیری	۲.۵
۷۴	مزایای این چالش و حل آن	۱.۲.۵

۷۴	۲.۲.۵	معایب پروژه انجام شده
۷۴	۳.۲.۵	نوآوری‌های این پروژه
۷۵	۳.۵	پیشنهادهات
۷۷		کتاب‌نامه
اول		واژه‌نامهٔ فارسی به انگلیسی
دوم		واژه‌نامهٔ انگلیسی به فارسی

فهرست تصاویر

۱.۱	مقایسه قابلیت‌های کلیدی IMT-Advanced (نسل ۴) با IMT-2020 (نسل ۵) با توجه به
۳	ITU-R M.2083 [۱]
۲.۱	ساختار سنتی ایستگاه پایه [۲]
۳.۱	ساختار ایستگاه پایه و واحد رادیویی [۲]
۴.۱	ساختار C-RAN [۲]
۵.۱	ساختار شبکه‌ی C-RAN [۲]
۶.۱	ساختار شبکه‌های دسترسی ابری نامتجانس [۳]
۷.۱	مدل سیستم F-RAN [۴]
۸.۱	ساختار شبکه‌ی vRAN [۵]
۹.۱	ساختار شبکه‌ی ORAN [۶]
۱۰.۱	ساختار NFV [۷]
۱۱.۱	ساختار SDN [۸]
۱۲.۱	سه ساختار برش شبکه [۹]
۱.۲	روند برش شبکه [۱۰]
۲.۲	مدل پردازشی شبکه صف [۱۱].
۳.۲	یادگیری تقویتی
۴.۲	سناریوی ارسال لینک بالا و پایین در برشهای شبکه
۱.۳	برش شبکه در ORAN
۲.۳	بهره‌وری انرژی براساس تعداد کاربران در هر سرویس

۳.۳	بهره‌وری انرژی براساس تعداد بلوکهای منابع فیزیکی	۵۹
۴.۳	بهره‌وری انرژی براساس تعداد سرویسهای مختلف	۶۰
۵.۳	نسبت برش های پذیرفته شده فقط به یک DC در مقابل برش های کل	۶۰
۶.۳	نرمالیزه‌ی مصرف منابع براساس تعداد برشها	۶۱
۱.۴	نسبت تعداد سرویسهای پذیرفته شده با استفاده از روش یادگیری تقویتی عمیق به نسبت	
۶۹	تعداد سرویسهای پذیرفته شده در حالت بهینه براساس زمان طی شده	
۲.۴	نسبت تعداد سرویسهای پذیرفته شده روش استفاده شده به نسبت تعداد سرویسهای پذیرفته	
	شده در حالت بهینه براساس زمان طی شده با افزایش تعداد ماکسیمم درخواستها و تعداد	
۷۰	برشهای شبکه	
۳.۴	میانگین تعداد سرویسهای پذیرفته شده در زمان در دو حالت بهینه و استفاده از الگوریتم	
۷۰	تقویتی با افزایش تعداد برشهای شبکه	
۴.۴	نسبت تعداد سرورهای مصرفی با روش بهینه به سرورهای مصرفی با استفاده از روش یادگیری	
۷۱	تقویتی براساس زمان طی شده	
۵.۴	نسبت مقدار هزینه‌ی مصرفی نرمالیزه شده به تعداد میانگین برشهای مورد نیاز در جالت	
۷۲	بهینه و الگوریتم یادگیری تقویتی	

فهرست جداول

۱.۳	پارامترهای شبیه‌سازی	۵۷
۲.۳	پارامترهای شبیه‌سازی	۵۸

فهرست الگوریتم‌ها

۵۲	۱.۳	اتصال سرویس به برش شبکه
۵۴	۲.۳	برش شبکه و تخصیص منابع
۵۶	۳.۳	قرار گیری منابع مجازی در منابع فیزیکی

فهرست برنامه‌ها

فصل ۱

مقدمه

۱.۱ مقدمه ای بر 5G

5G، مخابرات نسل پنجم سیستمهای بیسیم^۱ و شبکه‌های مخابراتی بعد از نسل چهارم می‌باشد که تکاملی از لایه‌ی فیزیکی در تکنولوژی شبکه‌های مخابراتی سیار همانند LTE است که نسبت به 4G سرعت و پوشش بهتری را فراهم می‌کند. 5G نوع جدیدی از شبکه را ایجاد می‌کند که به منظور اتصال تقریباً همه و همه چیز با هم از جمله ماشینها، اشیاء و دستگاه‌ها ساخته شده است. 5G فناوری بی سیم برای ارائه سرعت داده‌های چند گیگابیت بر ثانیه، تأخیر فوق العاده کم، قابلیت اطمینان بیشتر، ظرفیت شبکه گسترده، افزایش در دسترس بودن و تجربه کاربری یکنواخت تر به کاربران بیشتر است. عملکرد بالاتر و بهره وری بهبود یافته باعث افزایش تجربیات کاربر جدید شده و صنایع جدیدی را به هم متصل می‌کند.

تکنولوژی سیگنال 5G برای پوشش فراگیرتر و بازدهی بهتر سیگنال ایجاد شده است. این پیشرفت‌ها منجر به تغییراتی از قبیل IOT^۲ و Pervasive Computing در آینده‌ی نزدیک خواهد شد. همچنین 5G منجر به توسعه و بهبود سرویسهای مخابراتی و اینترنتی سیار و در ورای آن، ایجاد تجربه‌ی بهتری برای مصرف کنندگان خواهد شد.

برای توسعه‌ی اینترنت سیار و IOT، نیازمند استفاده از شبکه‌ی نسل پنجم هستیم تا به سادگی منجر به دسترسی شبکه برای ارتباط انسان‌ها با یکدیگر و ارتباط ماشین با انسان گردد.

به طور کلی، 5G در سه نوع سرویس اصلی متصل از جمله پهن باند تلفن همراه، IoT عظیم و ارتباطات

¹Wireless

²Internet of Things

مهم برای مأموریت استفاده .

۱. پهن باند تلفن همراه پیشرفته (eMBB) برای مقابله با نرخ داده‌های بسیار زیاد، تراکم بالای کاربران و ظرفیت ترافیک بسیار بالا برای سناریوهای مختلف و همچنین پوشش یکپارچه و سناریوهای تحرک بالا با نرخ داده‌های استفاده شده بهبود یافته است.

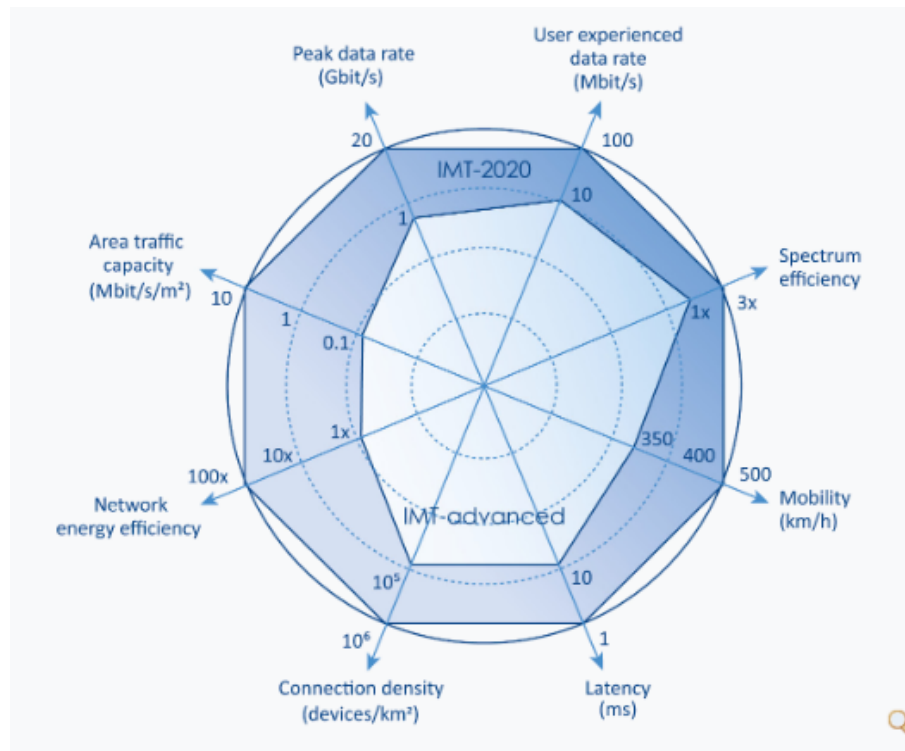
۲. ارتباطات عظیم ماشین (mMTC) برای IoT، برای تعداد بسیار زیاد دستگاه‌های متصل به مصرف کم و نرخ داده کم نیازمند می‌باشد.

۳. ارتباطات بسیار مطمئن و با تأخیر کم (URLLC) برای برنامه‌های کاربردی مهم برای ایمنی و مأموریت مورد توجه است.

از آنجا که ساختار 5G کمتر به زیرساخت‌های 4G وابسته می‌شود و طیف بیشتری در دسترس قرار می‌دهد، تخمینها سرعت بارگیری را حداکثر ۱۰۰۰ برابر سریعتر از 4G در نظر دارد، که بالقوه از 10Gbps بیشتر است، که به شما امکان می‌دهد تا در کمتر از یک ثانیه فیلم کامل HD را بارگیری کنید. برخی تخمینها محافظه کارانه تر هستند، اما حتی محافظه کارانه‌ترین تخمین نیز این نسل را چندین ده برابر سریعتر از 4G قرار می‌دهد. دلایل نیاز به نسل پنجم اینترنت به طور خلاصه در ادامه بیان شده است [۱].

- ترافیک داده‌های تلفن همراه به دلیل پخش ویدئو به سرعت، رو به افزایش است.
- با در اختیار داشتن چندین دستگاه به طور همزمان، هر کاربر تعداد فزاینده‌ای از اتصالات را در اختیار دارد.
- اینترنت اشیاء به شبکه‌هایی نیاز دارد که میلیاردها دستگاه را اداره کنند.
- با وجود تعداد فزاینده‌ای از دستگاه‌های ارتباطی و افزایش ترافیک داده‌ها، هم دستگاه‌ها و هم شبکه‌ی آن نیازمند افزایش بهره‌وری انرژی هستند.
- به دلیل تحت فشار قرار گرفتن اپراتورهای شبکه برای کاهش هزینه‌های عملیاتی و همچنین به دلیل اینکه کاربران به تعرفه‌های نرخ مسطح عادت می‌کنند و مایل نیستند مبلغ بیشتری بپردازند.
- فناوری ارتباطات سیار میتواند موارد استفاده جدیدی را ایجاد کند (به عنوان مثال موارد تاخیر فوق العاده کم یا قابلیت اطمینان بالا) و برنامه‌های جدید برای صنعت که منجر به درآمدزایی بیشتر اپراتورها می‌گردد.

بنابراین عملکرد عملیاتی نسل پنجم می‌بایست به طور قابل توجهی افزایش یابد (به عنوان مثال افزایش راندمان طیفی، سرعت بالاتر داده، تأخیر کم). زیرساخت 5G می‌بایست در حالی که هنوز سطح قابل قبولی از مصرف انرژی، هزینه تجهیزات و استقرار شبکه و هزینه بهره‌برداری را ارائه می‌دهد، اینترنت اشیاء را به طور گسترده نیز تأمین کند. همچنین از طیف گسترده‌ای از برنامه‌ها و خدمات پشتیبانی کند.



شکل ۱.۱: مقایسه قابلیت‌های کلیدی IMT-Advanced (نسل ۴) با IMT-2020 (نسل ۵) با توجه به ITU-R M.2083 [۱]

یکی از دلایل مهم رفتن محققان به سمت نسل پنجم، سرعت و نرخ انتقال بیشتری است که در ادامه به آن می‌پردازیم. نیاز بشریت به ارتباط تلفنی (انتقال بدون سیم به صورت زمان حقیقی^۳ انسان را به سمت نسل اول ارتباطات 1G سوق داده است. نسل دوم ارتباطات 2G با سرویسهای انتقال پیام کوتاه ایجاد شد. همچنین با موفقیت تکنولوژی شبکه‌های منطقه ای بیسیم، اتصال به داده‌های اینترنتی مورد توجه عموم مردم قرار گرفت که پلی به سوی نسل سوم ارتباطات 3G را فراهم نمود. به طور منطقی پله‌ی بعدی گام برداشتن در راستای کوچک شدن لپ‌تاپ و در آمیختن آن با تلفن که امروزه به صورت تلفن هوشمند^۴ است و دسترسی به اینترنت، پهنای باند بالا و داده‌ها در نقاط مختلف جهان بوده است که 4G یا نسل چهارم را به همراه داشته است. با توجه به افزایش

³Real Time

⁴smart phone

تعداد کاربران تلفن‌های هوشمند و تبلت‌ها و افزایش نرخ ارسال اطلاعات و داده‌ها در طی سالهای اخیر طبق پیش‌بینی‌های سیسکو میزان ترافیک IP طی سالهای اخیر چندین برابر افزایش خواهد یافت. در نتیجه اپراتورها برای حل این مشکل و خدمات‌دهی بهتر ناچار به افزایش ظرفیت شبکه می‌باشند. در ادامه به طور مختصر به نسلهای اخیر مخابراتی می‌پردازیم [۱۲]. در ادامه مروری بر نسلهای مختلف مخابرات خواهیم داشت.

۱.۱.۱ نسل چهارم مخابرات

4G یک فناوری بسیار متفاوت در مقایسه با 3G است و هدف از آن، فراهم آوردن سرعت بالا، کیفیت بالا و ظرفیت بالا برای کاربران در عین بهبود امنیت و کاهش هزینه خدمات صوتی و دیتا، چندرسانه‌ای و اینترنت از طریق IP می‌باشد. برنامه‌های کاربردی بالقوه و جاری شامل دسترسی به وب موبایل اصلاح شده، تلفن تلفنی IP، خدمات بازی، تلویزیون همراه با کیفیت بالا، کنفرانس ویدیویی، تلویزیون سه بعدی و محاسبات ابری از قابلیت‌های پشتیبانی آن می‌باشد.

فن‌آوریهای کلیدی که این امکان را ایجاد کرده اند MIMO^۵ و OFDM^۶ می‌باشد. دو استاندارد مهم آن LTE^۷ و WiMAX می‌باشد. حداکثر سرعت یک شبکه 4G هنگام حرکت دستگاه ۱۰۰ مگابیت بر ثانیه یا ۱ گیگابیت بر ثانیه برای ارتباطات کم تحرک مانند هنگام ایستادن یا راه رفتن است. تأخیر از حدود 300ms به 100ms با کاهش تراکم دست می‌یابد.

۲.۱.۱ نسل پنجم مخابرات

تکنولوژی 5G یک استاندارد صنعتی است که جایگزین استاندارد رایج کنونی یعنی 4G LTE خواهد شد. این فناوری پنجمین نسل از استاندارد سلولی است. طراحی این استاندارد به گونه‌ای است که سرعت آن از تکنولوژی 4G LTE بسیار سریع تر است. البته هدف این استاندارد صرفاً افزایش سرعت اتصالات اینترنتی تلفنهای هوشمند نیست. این استاندارد، اینترنت بی سیم بسیار پرسرعتی را در همه جا و برای همه چیزها از جمله خودروهای متصل، خانه‌های هوشمند و ابزارهای اینترنت اشیا (IoT) فراهم خواهد کرد. کاهش مصرف انرژی معیاری است که در این نسل به آن توجه شده است و دستگاه‌های فرستنده و گیرنده اپراتورها باید در ساعت کم مصرف به حالت صرفه‌جویی انرژی وارد شده و به سرعت فعال شوند که این معیار در نسل چهارم قید نشده بوده است.

^۵Multiple Output Multiple Output

^۶Multiplexing Division Frequency Division

^۷Long Term Evolution

با توجه به این که نرخ داده و ظرفیت در سیستمهای نسل چهارم به ظرفیت شانون نزدیک شده است، در نتیجه روشهایی که برای افزایش ظرفیت شبکه مورد استفاده میگیرند که به شرح زیر است:

- استفاده از تکنیک Massive MIMO
- استفاده از روشهای پردازشهای ابری
- شبکه‌ی تعریف شده‌ی نرم‌افزاری SDN^۸
- موج میلیمتری^۹
- ساختار شبکه‌های دسترسی رادیویی باز ORAN^{۱۰}
- مجازی سازی توابع شبکه NFV^{۱۱}
- برش شبکه^{۱۲}

۲.۱ مقدمه‌ای بر ساختار ORAN

مجازی سازی RAN توجه زیادی را از طرف اپراتورها به خود جلب می‌کند، زیرا منجر به کاهش هزینه‌های اپراتور و opex می‌شود و همچنین این امکان را برای آنها فراهم کرده تا با سرعت بیشتری قابلیت‌های جدیدی به شبکه اضافه کنند.

این احتمال وجود دارد که همه این علاقه‌ها در ایجاد سه گروه مختلف باشد - انجمن xRAN، گروه OpenRAN شرکت Telecom Infra و ابتکار عمل Open VRAN که برای شرکت سیسکو می‌باشد. اگرچه همه این گروه‌ها می‌گویند که در حال کار بر روی یک چیز هستند، که اساساً برای باز کردن RAN با استفاده از رابط‌های استاندارد و عناصر شبکه جعبه سفید است، اما در بررسی دقیق تر اختلافاتی نیز وجود دارد. شبکه‌ی دسترسی باز^{۱۳} (ORAN) تبسیط و ترکیبی از دو ساختار C-RAN^{۱۴} و xRAN می‌باشد که انتظار می‌رود که در فناوری نسل پنجم مخابرات مورد استفاده قرار گرفته و منجر به بهبود عملکرد شبکه‌های دسترسی

⁸Software Defined Networking

⁹mm Wave

¹⁰Open Radio Access Network

¹¹Network Function Virtualization

¹²Network Slicing

¹³Open RAN

¹⁴Cloud Radio Access Network

رادیویی RAN گردد. این ساختار یک شبکه ی باز، انعطاف پذیر و هوشمند است.

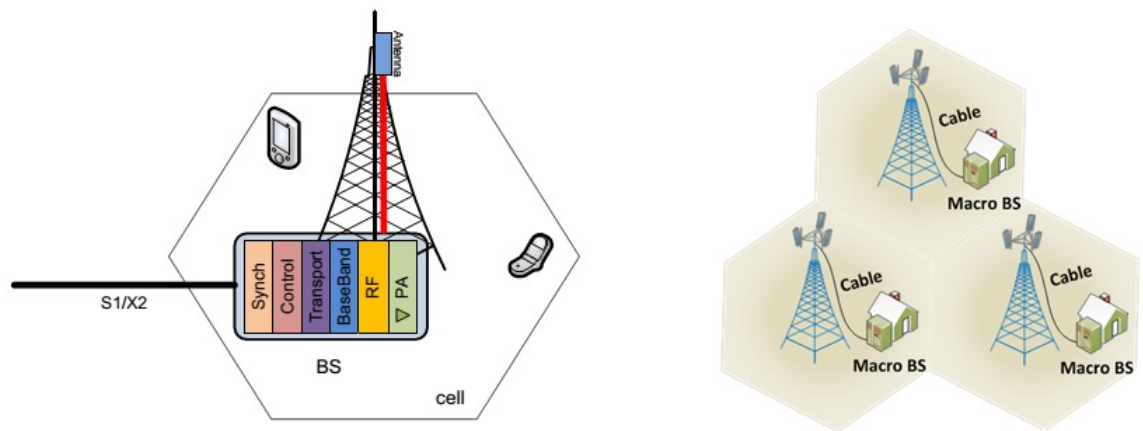
ORAN توابع شبکه‌ی دسترسی رادیویی را به سه قسمت تقسیم می‌کند، که قسمت اول واحد از راه دور (RU)^{۱۵}، واحد توزیع شده (DU)^{۱۶} و واحد مرکزی (CU)^{۱۷} می‌باشد. در حالی که RU دارای توابع فیزیکی^{۱۸} (PHY) لایه‌ی پایین تر است، DU حاوی (PHY) بالاتر، MAC^{۱۹} و RLC^{۲۰} است و (CU) حاوی RRC^{۲۱}، PDCP^{۲۲} و SDAP^{۲۳} است.

CU و DU به عنوان توابع شبکه مجازی (VNFs) پیاده سازی می‌شوند، که در یک محیط ابر اجرا می‌شود. رابطهای بین RU، CU و DU رابطهای استاندارد باز هستند.

۱.۲.۱ مقدمه ای بر ساختار شبکه‌های دسترسی رادیویی C-RAN

شبکه‌های دسترسی رادیویی ابری منجر به افزایش پوشش ارسالی می‌گردد. با توجه به ساختار شبکه C-RAN که معماری جدیدی را برای شبکه‌های نسل آینده ارائه می‌دهد، نه تنها ظرفیت شبکه افزایش می‌یابد بلکه مشکلاتی که در روشهای دیگر وجود دارد را نیز هموار می‌سازد. مفهوم شبکه دسترسی رادیویی ابر C-RAN، به مجازی سازی کارکردهای ایستگاه پایه^{۲۴} با استفاده از تکنولوژی رایانش ابری^{۲۵} اشاره می‌نماید. این مفهوم به ایجاد یک ساختار سلولی جدید منجر می‌شود که در آن، نقاط دسترسی بیسیم کم هزینه که با عنوان واحدهای رادیویی^{۲۶} و یا رادیو هدهای راه دور^{۲۷} شناخته می‌شوند- با استفاده از یک ابر متمرکز با قابلیت پیکربندی مجدد و یا واحد مرکزی^{۲۸} مدیریت می‌شوند. شبکه امکان کاهش هزینه‌های سرمایه گذاری و عملیاتی مورد نیاز برای اپراتورها به منظور توسعه و نگهداری شبکه‌های ناهمگن متراکم را فراهم می‌آورد. این مزیت مهم در کنار بازده طیفی، تسهیم آماری^{۲۹}، و مزیت‌های متعادل سازی بار باعث می‌شود تا شبکه C-RAN به عنوان یکی از تکنولوژیهای کلیدی در توسعه سیستمهای 5G در جایگاه بسیار مناسبی قرار بگیرد. در ادامه، یک بررسی کلی و مختصر از تحقیقات جدید در

¹⁵remote unit¹⁶Distributed unit¹⁷Central unit¹⁸Physical layer¹⁹Medium Access Control²⁰Radio Link Control²¹Radio Resource Control²²Packet Data Convergence Protocol²³Service Data Adaptation Protocol²⁴Base Station-BS²⁵Cloud Computing²⁶Radio Units²⁷Radio Remote Heads²⁸Control Unit²⁹Statistical Multiplexing



شکل ۲.۱: ساختار سنتی ایستگاه پایه [۲]

مورد ساختار C-RAN ارائه می‌شود و موضوعات مورد تاکید عبارتند از فشرده سازی لینک fronthaul پردازش باند پایه، کنترل دسترسی به محیط واسط، تخصیص منابع، ملاحظات سطح سیستم، و تلاشهای انجام شده در راستای ارائه استانداردها.

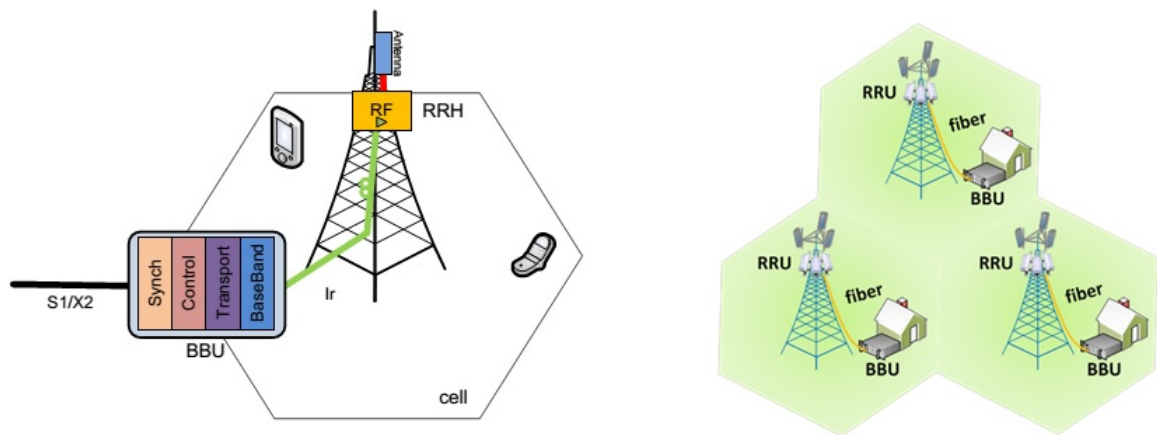
۱.۱.۲.۱ ساختار شبکه‌های مختلف

با توجه به مقاله ی [۲]، هر ایستگاه پایه دو نوع پردازش انجام می‌دهد: پردازش رادیویی که توسط واحد رادیویی^{۳۰} انجام می‌شود و شامل پردازش دیجیتالی، فیلترینگ فرکانسی، تقویت توان و می‌باشد و پردازش باند پایه که توسط واحد باند پایه^{۳۱} که همان واحد کنترل است^{۳۲} انجام شده و از جمله مهمترین وظایف آن می‌توان به کدینگ، مدولاسیون و تبدیل فوریه ی سریع اشاره کرد. در ساختار جدیدی که تحت عنوان C-RAN معرفی خواهیم نمود نحوه ی ارتباط پردازشگرهای رادیویی و باند پایه متحول شده و در نتیجه مزایایی برای شبکه حاصل خواهد شد. در ادامه، انواع ساختارها را بیان خواهد شد.

³⁰RRH

³¹BBU

³²CU



شکل ۳.۱: ساختار ایستگاه پایه و واحد رادیویی [۲]

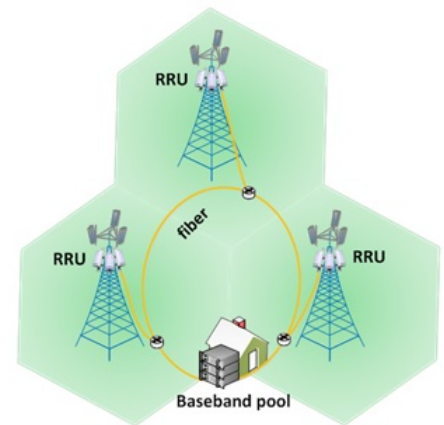
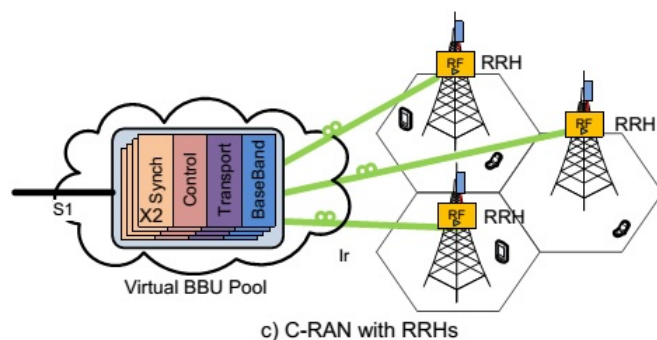
۲.۱.۲.۱ ساختار سنتی ایستگاه پایه

در ساختارهای سنتی ایستگاه پایه، پردازشهای رادیویی و باند پایه در داخل ایستگاه پایه انجام شد و مدول آنتن نیز در فاصله‌ی چند متری از مدول رادیویی نصب شده و ارتباط آنها توسط کابل کواکسیال برقرار میشد که همین امر سبب افزایش تلفات در شبکه می‌باشد. این نوع ساختار در شکل ۱.۳ نشان داده شده است. همان گونه که مشاهده میکنید ارتباط بین ایستگاه‌های پایه توسط ارتباط X_2 و ارتباط بین ایستگاه پایه و شبکه‌ی هسته توسط ارتباط S_1 برقرار می‌شود. این نوع ساختار در شبکه‌های 1G و 2G به کار گرفته شده است [۲].

۳.۱.۲.۱ ساختار ایستگاه پایه و واحد رادیویی

در این ساختار واحد رادیویی و واحد پردازشی سیگنال، از هم مجزا شده و واحد رادیویی که تحت عنوان RRH یا RRU نیز شناخته می‌شود، توسط فیبر نوری به واحد باند پایه یا BBU اتصال می‌یابد. همان طور که پیشتر بیان شد واحد رادیویی مسئولیت انجام پردازشهای دیجیتالی از جمله تبدیل آنالوگ به دیجیتال، دیجیتال به آنالوگ، تقویت توان و فیلترینگ را بر عهده دارد، که تفکیک وظایف واحد پردازشی و واحد رادیویی در این ساختار در شکل ۳.۱ قابل مشاهده است. این نوع ساختار برای شبکه‌های نسل سوم معرفی شده و امروزه نیز بیشتر ایستگاه‌های پایه از همین ساختار بهره می‌گیرند. از جمله ویژگیهای بارز این ساختار امکان ایجاد فاصله بین واحد رادیویی

و پردازشی می‌باشد، که این فاصله به دلیل تاخیر پردازشی و انتشاری نمیتواند از ۴۰ کیلومتر فراتر رود. در این ساختار تجهیزات مرتبط با BBU می‌توانند به مکانی مناسب‌تر که قابل دسترسی تر بوده و هزینه‌ی اجاره و نگهداری کمتری را به اپراتورها تحمیل می‌کنند منتقل شوند و واحدهای رادیویی نیز در پشت بام ساختمانها و مکانهای مرتفع نصب می‌شوند که این خود سبب کاهش هزینه‌های خنک سازی ادوات موجود می‌شود. نحوه‌ی ارتباط بین RRH و BBU مشابه ساختار سنتی بوده و RRHها نیز توسط معماری زنجیروار باهم در ارتباطند.



شکل ۴.۱: ساختار C-RAN [۲]

۴.۱.۲.۱ ساختار C-RAN

در ادامه ساختارهای شبکه دسترسی رادیویی ابری و ساختارهای بهبود یافته‌ی آن را معرفی می‌نماییم.

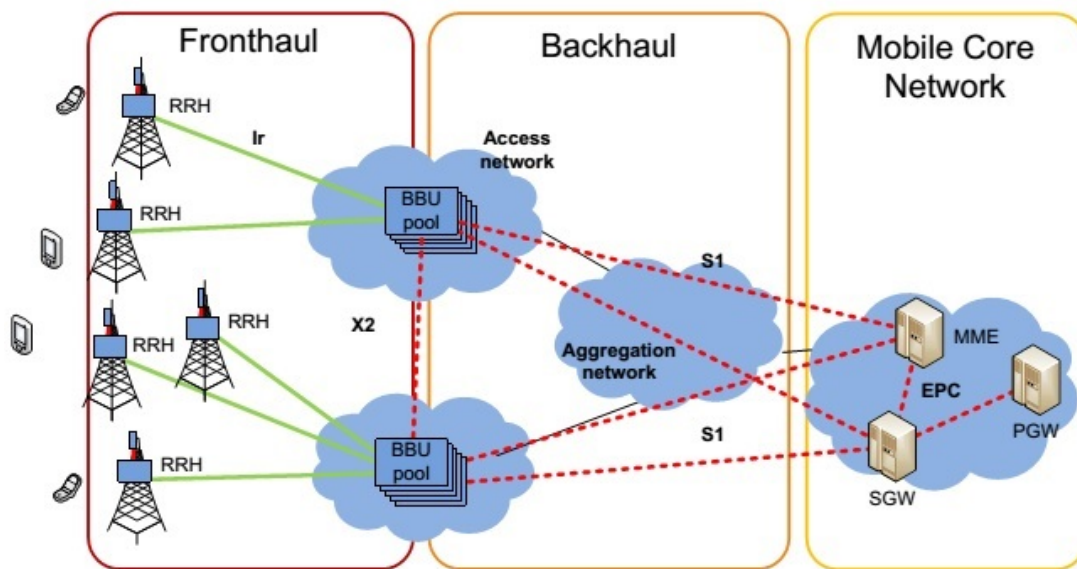
• شبکه‌های دسترسی رادیویی ابری

ایده اصلی C-RAN جداسازی بخش رادیویی (RRH)^{۳۳} از واحد پردازشی باند پایه (BBU)^{۳۴} است. از تجمع BBUها بر روی سرور ابری، BBU-Pool ایجاد می‌شود. در این ساختار، در راستای بهینه سازی عملکرد BBUها در مواجهه با ایستگاه‌های پایه پر ترافیک و کم ترافیک، BBUها به صورت یک مجموعه‌ی واحد تحت عنوان BBU Pool در آمده اند که این مجموعه بین چندین سلول به اشتراک گزاریده

^{۳۳}Radio Remote Head

^{۳۴}Baseband Unit

شده و مطابق شکل زیر مجازی سازی می‌شود. در توضیح بیشتر این ساختار میتوان این گونه عنوان کرد که BBU Pool به عنوان یک خوشه ی مجازی در نظر گرفته می‌شود که شامل پردازش گرهایی می‌باشد که پردازش باند پایه را انجام می‌دهند. ارتباط بین BBU ها در ساختارهای فعلی به شکل X_2 برقرار می‌شود که در این ساختار ارتباط بین خوشه‌ها از فرم جدید X_2 تحت عنوان $X_2 + X_2$ برقرار می‌شود. در شکل ۵.۱ ساختار کلی شبکه‌ی C-RAN در سیستمهای LTE نمایش داده شده است. همان طور که در شکل قابل مشاهده می‌باشد ساختار کلی شبکه C-RAN به دو بخش backhaul و fronthaul تقسیم بندی شده است. بخش fronthaul شبکه به مرحله ی اتصال سایت‌های RRH به BBU Pool به اتصال backhaul و بخش BBU Pool هسته ی شبکه ی سیار اطلاق می‌شود. همان گونه که قبلا ذکر شد RRH ها در نزدیکی انتن نصب شده و از طریق لینکهای انتقالی نوری با پهنای باند وسیع و تاخیر کم به پردازشگرهای قوی در BBU متصل می‌شوند. توسط این لینکهای انتقالی است که سیگنالهای دیجیتال باند پایه از نوع IQ بین RRH و BBU انتقال می‌یابند [۲].

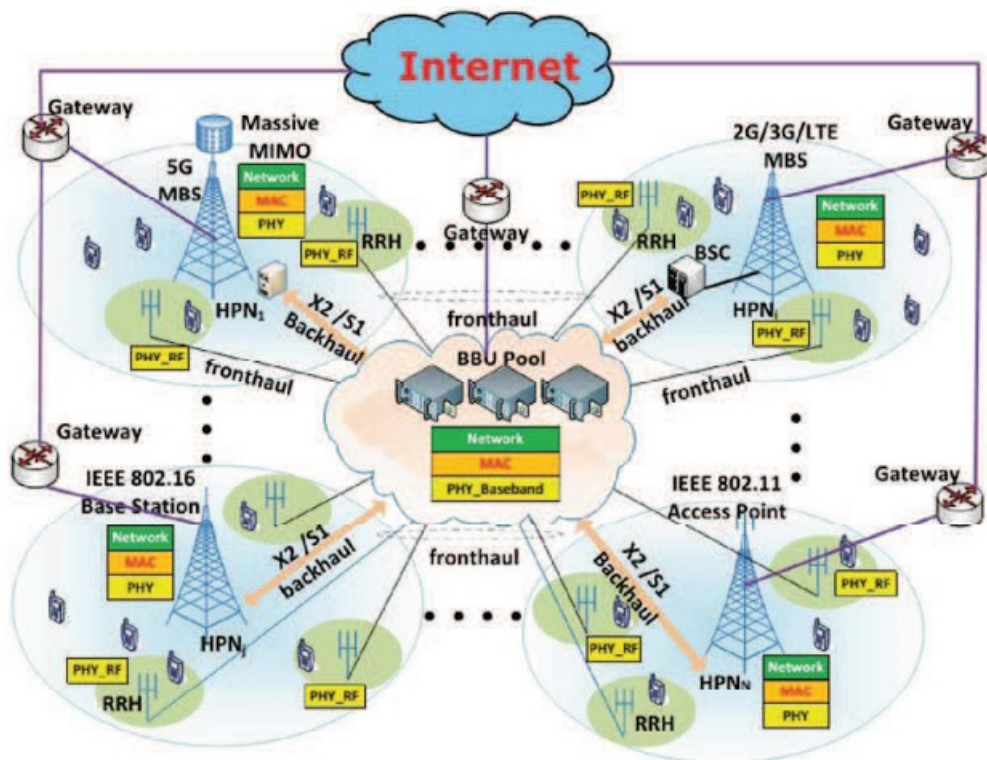


شکل ۵.۱: ساختار شبکه‌ی C-RAN [۲]

• شبکه‌های دسترسی رادیویی ابری نامتجانس (H-CRAN)

برای غلبه بر چالشهای شبکه‌های C-RAN با محدودیتهای fronthaul، شبکه‌های دسترسی رادیویی ابری نامتجانس (H-CRAN) معرفی می‌شود [۳، ۴، ۱۳].

صفحه‌ی کاربر و صفحه‌ی کنترلگر در چنین شبکه‌هایی از هم مجزا می‌باشند. در این شبکه‌ها، نودهای



شکل ۶.۱: ساختار شبکه‌های دسترسی رادیویی ابری نامتجانس [۳]

توان بالا^{۳۵} HPN، عمدتاً برای فراهم کردن پوشش بدون درز و اجرای عملکرد صفحه کنترل می‌باشد. در حالی که RRH‌ها برای فراهم نمودن سرعت بالای نرخ داده برای انتقال بسته در ترافیک قرار گرفته اند. HPN‌ها از طریق لینکهای backhaul به BBU Pool متصلند (برای هماهنگ کردن تداخل). ساختار این شبکه شبیه به ساختار C-RAN می‌باشد. همانطور که در شکل (۶.۱) نشان داده شده است، تعداد زیادی RRH، همراه با انرژی مصرفی کم در ساختار H-CRAN، با یکدیگر در BBU Pool مرکزی، همکاری می‌کنند تا گین مشترک بالایی بدست آورند. تنها، فرکانس رادیویی جلو، (RF) و عملکردهای پردازشی ساده، در RRH، صورت می‌گیرد، در حالی که پردازشهای مهم دیگر، در BBU Pool انجام می‌گیرد. همچنین تنها بخشی از عملکردها در لایه ی PHY در RRH به مشارکت می‌انجامد که این مدل در شکل (۶.۱) نشان داده شده است.

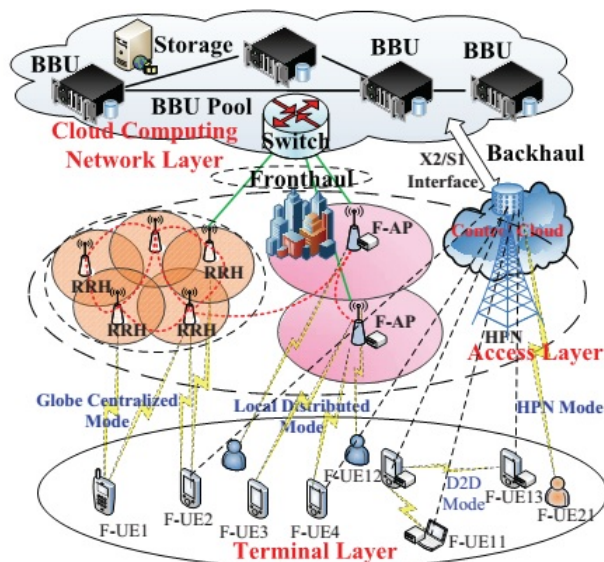
اگرچه، برخلاف C-RAN، BBU Pool در H-CRAN، به HPN‌ها متصلند که این، برای کاهش تداخل متقابل بین RRH‌ها و HPN‌ها از طریق محاسبات ابری متمرکز براساس تکنیکهای پردازشی مشترک می‌باشد. همچنین، داده و واسط کنترل، بین BBU Pool و HPN‌های S_1 و X_2 شناخته شده اند که تعریف آنها بر اساس تعریف استاندارد 3G ایجاد شده است.

همانطور که سرویسهای صدا، میتوانند به صورت بهینه در طول مد سوئیچ بسته در 4G فراهم گردند، H-CRAN میتواند به طور همزمان سرویس صدا و داده را پشتیبانی کند. سرویس صدا مرجع به اداره از طریق HPN‌ها می‌باشد، در حالی که ترافیک بسته ی پر داده، بیشتر توسط RRH اداره می‌گردد. در مقایسه با ساختار C-RAN، ساختار H-CRAN نیازهای fronthaul را بوسیله ی مشارکت HPN‌ها برطرف می‌سازد. با توجه به حضور HPN‌ها، سیگنالهای کنترلی و سیمبلیهای داده در H-CRAN جدا از هم می‌باشند. تمام کنترل کننده‌های سیگنال و سیستمهایی که اطلاعات را ارسال می‌نمایند، توسط HPN‌ها به UE، منتقل می‌گردد که منجر به سادگی در ظرفیت و در محدودیت تاخیر زمان در لینکهای fronthaul بین RRH‌ها و BBU Pool می‌گردد و منجر به صرفه‌جویی در مصرف انرژی می‌گردد. همچنین، برخی از ترافیکهای شدید و ناگهانی^{۳۶} و یا سرویس پیام همراه با مقدار داده‌ی کم، می‌تواند به صورت بهینه توسط HPN‌ها پشتیبانی گردد. مکانیزم کنترل بین ارتباط داشتن و نبود ارتباط، توسط H-CRAN پشتیبانی می‌گردد که منجر به حفظ کردن مقدار قابل توجهی Overhead در رادیو بوسیله ی مکانیزم ارتباط جهت دار خالص می‌گردد. در RRH، تکنولوژیهای مختلف انتقال در لایه ی PHY، قابل استفاده برای بهبود نرخ انتقال (همانند موج میلیمتری و نور مرئی) می‌گردد. در HPN‌ها، MIMO^{۳۷}، یکی از راه‌های افزایش پوشش در بهبود ظرفیت می‌باشد.

³⁵High Power Node³⁶Burst Traffic³⁷Multiple Input Multiple Output

• ساختار دسترسی رادیویی مهی

برای حل کردن مشکلات H-CRAN و C-RAN، نیاز به معرفی ساختار جدید دیگری می‌باشیم که آن را F-RAN می‌نامیم. F-RAN تمام ویژگیهای مثبت محاسبات ابری و شبکه‌های نامتجانس و محاسبات مهی را همزمان در بر می‌گیرد. محاسبات مهی، اصطلاحی برای جایگزین کردن محاسبات ابری است که مقدار قابل توجهی از ذخیره سازی، ارتباطات، کنترل کردن، اندازه گیری و مدیریت را در لبه ی شبکه انجام می‌دهد (نه در کانال و ابر مرکزی) [۴، ۱۳]. سیستمهای F-RAN تحولی از سیستمهای C-RAN می‌باشد که برخی از ارتباطات توزیع شده و عملکردهای ذخیره سازی در منطق لایه ی مه قرار دارد. همچنین چهار نوع ارتباطات ابری تعریف شده است.



شکل ۷.۱: مدل سیستم F-RAN [۴]

- ابر ذخیره‌گر و ارتباطات مرکزی جامع: که همانند ابر مرکزی C-RAN می‌باشد.
- ابر کنترل‌گر مرکزی: که برای تکمیل عملکردهای کنترلی می‌باشد و در HPN ها قرار دارد.
- ابر ارتباطات منطقی توزیع شده که در برنامه‌های محاسبات مهی و ابزارهای این محاسبات قرار دارد.
- ابر ذخیره‌گر منطق توزیع شده: که همانند قبل در F-RAN قرار دارد.

در این ساختار، برای کاهش تاخیر ناشی از انتقال داده‌ها به ابر مرکزی، ساختارهای RRH را دارای حافظه

قرار می‌دهیم که برای ارتباطات محلی، به جای اینکه پردازشها در BBU Pool صورت بگیرد، بدون نیاز به انتقال به ابر مرکزی، درون RRH‌ها انجام پذیرد.

۲.۲.۱ xRAN

xRAN در سال ۲۰۱۶ با هدف استانداردسازی یک جایگزین انعطاف پذیر و باز برای RAN مبتنی بر سخت افزار سنتی بدست آمده است. در این ساختار، سه حوزه ی مهم مورد بررسی قرار گرفته است. اولین حوزه ی مورد بررسی، جداسازی بخش صفحه ی کنترل^{۳۸} از صفحه ی کاربر^{۳۹} می باشد. حوزه ی دوم، ساختن یک پشته نرم افزاری eNodeB مدولار که از سخت افزار COTS استفاده می کند، می باشد. حوزه ی سوم مورد بررسی، انتشار رابطهای باز شمال و جنوب است [۱۴]. در ادامه این سه حوزه به طور دقیق تر مورد بررسی قرار میگیرد [۱۵].

- **جداسازی بخش صفحه ی کنترل از صفحه ی کاربر:** این انتقال صفحه ی کنترل، که قبلاً کاملاً به دستگاه‌های سخت افزاری RAN متصل بود، به دستگاه‌های محاسباتی در دسترس امکان می‌دهد RAN بتواند به عنوان یک استخر منطقی از ظرفیت، با کارایی بیشتری کار کند. نرم افزار eNodeB از سخت افزار خاص فروشنده جدا می شود و الهام بخش نوآوری در هر دو نرم افزار و سخت افزار به صورت مشارکتی اما به طور مستقل است. برنامه نویسی و کنترل زمان واقعی بی سابقه در زیرساختهای RAN به دست آمده است، که به راحتی از برنامه‌های کاربردی تلفن همراه و خدمات تجاری پشتیبانی می‌کند.
- **ساختن یک پشته نرم افزاری eNodeB مدولار:** رویکرد xRAN به خوبی با طرحهای مجازی سازی عملکرد شبکه حامل (NFV) مطابقت دارد، و همچنین منجر به کنترل عملکرد ترافیک با کارایی بالا، مدیریت تداخل و کنترل منابع رادیویی روی سیستم عاملهای استاندارد x86 می‌شود.
- **انتشار رابطهای باز شمال و جنوب:** رابطهای استاندارد و باز قابلیت پشتیبانی از فروشنده‌های متعدد همکاری اثبات شده دارند. xRAN.org و اعضای آن به تصویب رساندن این رابطها از طریق فرآیندهای استاندارد منجر به در دسترس قرار دادن معماری xRAN و پشتیبانی مورد نیاز می‌شوند.

در ادامه مزایای ساختار xRAN را بیان می‌نماییم.

مزایای ساختار xRAN

³⁸control plane

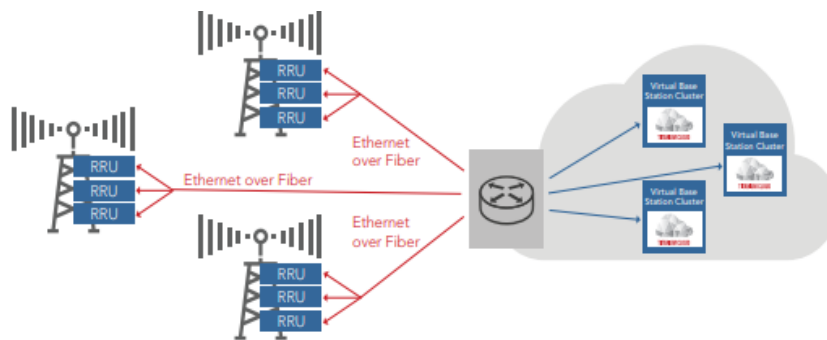
³⁹user plane

- جداسازی بخش صفحه ی کنترل از صفحه ی کاربر منجر به برنامه ریزی زمان واقعی بی سابقه و کنترل در زیرساخت RAN می‌شود که به راحتی برنامه‌های کاربردی تلفن همراه و خدمات تجاری را پشتیبانی می‌کند.
- یک پشته eNB مدولار مبتنی بر نرم‌افزار، منجر به امکان قرارگیری انعطاف پذیر توابع eNB و کنترل ترکیبی آن با یک برنامه ریز امکان پذیر می‌شود تا بتواند زمان تاخیر متغیر در fronthaul را کنترل کند.
- رابط‌های مرزی جنوبی استاندارد، پیاده سازی شبکه با خرید سیستم از چندین شرکت متفاوت را امکان پذیر می‌سازد و رابط‌های شمال مرزی، برش کامل شبکه برای بهینه سازی QoE⁴⁰ کاربر را فراهم می‌کند. رابط‌های xRAN به خوبی با لبه ابر حامل هماهنگ هستند و اجازه می‌دهد تا محاسبه و ذخیره سازی منابع در شبکه تلفن همراه به صورت دینامیکی مدیریت شود.
- این ساختار هزینه‌ی رشد ظرفیت دسترسی رادیویی و هزینه‌ی بهره برداری را کاهش می‌دهد.

۳.۲.۱ vRAN

vRAN یا شبکه‌های دسترسی رادیویی مجازی گونه‌ی دیگری از شبکه‌های رادیویی دسترسی می‌باشند که منجر به افزایش هوشمندانه ظرفیت، کاهش چشمگیر هزینه‌ها می‌شود. همچنین قابلیت انعطاف پذیری و مقیاس پذیری پویا را فراهم می‌کند که برای پشتیبانی از خدمات و برنامه‌های آینده ضروری خواهد بود. معماری vRAN با اجرای توابع باند پایه مجازی بر روی سخت افزار سرور کالا، بر اساس اصول مجازی سازی توابع شبکه (NFV) فراتر از آخرین شبکه‌ی متمرکز رادیویی (C-RAN) است. معماری C-RAN می‌تواند با ایجاد امکان تجمع منابع پردازش باند پایه، که می‌تواند به صورت پویا به سایت‌های مختلف سلول و فن‌آوری‌های رادیویی اختصاص یابد، گامی فراتر رود. به اشتراک گذاری منابع باند پایه از طیف موجود با کارایی بیشتری استفاده می‌کند و قابلیت اطمینان سرویس را بهبود می‌بخشد. همچنین پشتیبانی از ویژگی‌های LTE-Advanced و استقرار سلول‌های کوچک می‌تواند ظرفیت را در مناطق پرجمعیت و نقاط پرتردد افزایش دهد. اما تمرکز باند متمرکز (BBU-Pool) به اندازه کافی پیش نمی‌رود. برای دستیابی به پتانسیل کامل صرفه‌جویی در هزینه، مقیاس‌گذاری ظرفیت پویا، کیفیت بالاتر و ارائه سریع سرویس‌های جدید، می‌بایست از یک معماری RAN مجازی (vRAN) استفاده کنند. در مدل vRAN، BBU مجازی شده است. vBBU که همان واحدهای باند پایه‌ی مجازی هستند، در چندین سیستم عامل NFV در سخت افزار استاندارد x86 مستقر شده و در مراکز داده متمرکز تلفیق می‌شوند، در حالی که واحدهای رادیویی از راه دور (RRH) در سایت‌های سلول در لبه باقی می‌مانند. vRAN از سخت افزار

⁴⁰Quality of Experience



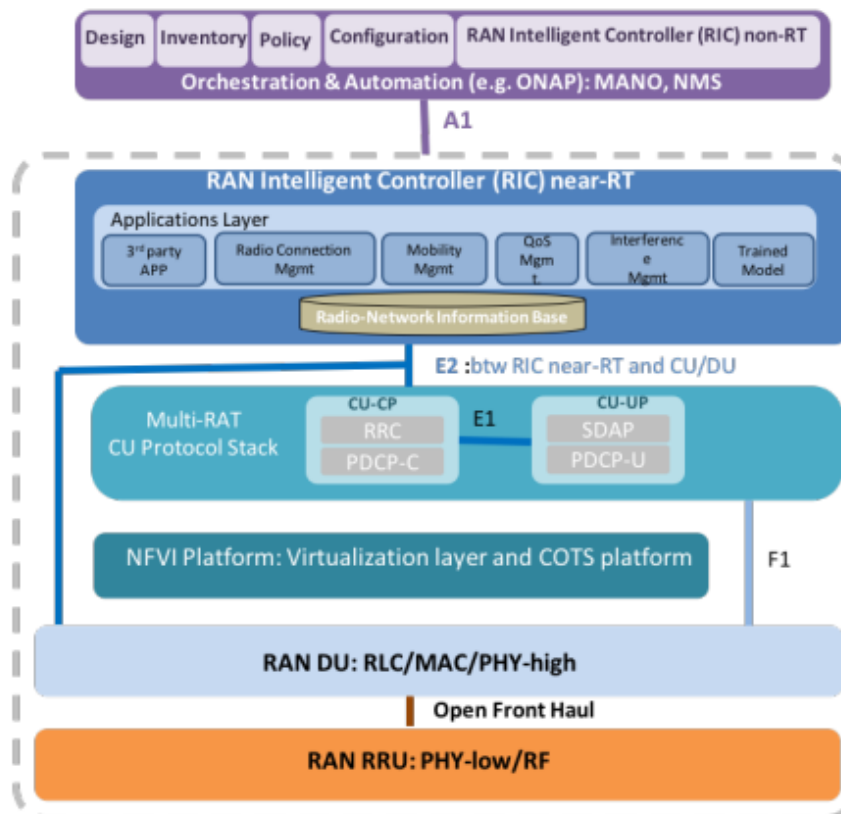
شکل ۸.۱: ساختار شبکه‌ی vRAN [۵]

استاندارد سرور استفاده می‌کند که به طور مقرون به صرفه پردازش، حافظه و منابع ورودی و خروجی را با تقاضای خود، درخواست می‌کند و ظرفیت RAN را با هوش مصنوعی تغییر داده تا کیفیت و قابلیت اطمینان خدمات را به طور قابل توجهی بهبود بخشد. بسته به نحوه تقسیم عملکردهای eNodeB معماری vRAN همچنین امکان انتقال اترنت و IP را فراهم می‌کند، که به ارائه‌دهندگان خدمات گزینه‌های مقرون به صرفه‌تری برای انتقال fronthaul می‌دهد [۵].

۴.۲.۱ ORAN

شبکه دسترسی رادیویی باز از ترکیب C-RAN و xRAN و در برخی جاها از ترکیب C-RAN و vRAN بدست آمده است. معماری ORAN برای ایجاد زیرساختهای RAN نسل بعدی طراحی شده است. معماری ORAN با تکیه بر اصول هوشمندی و باز بودن، پایه و اساس ساخت RAN مجازی بر روی سخت افزار آزاد، با کنترل رادیویی ایجاد شده توسط هوش مصنوعی است که توسط اپراتورهای سراسر جهان پیش بینی شده است. این معماری بر روی رابطهای استاندارد و تعریف شده ای بنا شده است تا یک زنجیره اکوسیستم با قابلیت باز ایجاد کند که دارای پشتیبانی کامل از استانداردهای تبلیغ شده توسط 3GPP و سایر سازمانهای استاندارد صنعت فراهم شود. اتحاد ORAN در جستجوی چشم انداز باز بودن و هوشمندی برای شبکه‌های بی سیم نسل بعدی و فراتر از آن است [۶]. این دو ویژگی مهم در ادامه مورد بررسی قرار گرفته شده است.

- **باز بودن:** ایجاد یک RAN مقرون به صرفه نیاز به باز بودن ارتباطها دارد. رابطهای باز برای فعال کردن فروشندگان و اپراتورهای کوچکتر به سرعت میتوانند خدمات خود را معرفی کنند و یا اپراتورها را قادر می‌سازد تا شبکه را متناسب با نیازهای منحصر به فرد خود تنظیم کنند. رابطهای باز همچنین استقرار چند سازنده ای را قادر می‌سازد و اکوسیستم تأمین کننده رقابتی تر و پر جنب و جوش بیشتری را ایجاد



شکل ۹.۱: ساختار شبکه‌ی ORAN [۶]

می‌کند. همچنین نرم‌افزارهای منبع باز و طرحهای مرجع سخت افزار باعث نوآوری سریعتر و دموکراتیک تر می‌شود.

- **هوشمندی شبکه‌ها** با ظهور برنامه 5G پیچیده تر و متراکم تر شده و خواستار برنامه‌های غنی تر می‌شوند. برای کاستن این پیچیدگی نمیتوان از ابزارهای سنتی انسانی برای استقرار، بهینه سازی و بهره برداری از شبکه استفاده کرد. در نتیجه، شبکه‌ها باید خود متحرک شوند تا بتوانند از فن آوریهای جدید مبتنی بر یادگیری برای خودکارسازی عملکرد شبکه‌های عملیاتی و کاهش OPEX استفاده کنند. اتحاد ORAN تلاش خواهد کرد تا از تکنیکهای یادگیری عمیق در حال ظهور استفاده کند تا بتواند هر لایه از معماری RAN را به طور هوشمند پیاده سازی کند. پیاده سازی هوشمند هم در مولفه‌ها و هم در سطح شبکه اعمال می‌گردد و منجر به تخصیص دینامیکی منابع رادیویی و بهینه سازی بازدهی شبکه می‌گردد. همراه با رابطهای باز ORAN، اتوماسیون حلقه بسته بهینه شده با هوش مصنوعی دست یافتنی است و دوره جدیدی را برای عملیات شبکه امکان پذیر می‌کند.

در ادامه ویژگی های این ساختار را بررسی می‌نماییم.

- **روشهای هوش مصنوعی AI^{۴۱} منجر به هوشمندسازی بخش رادیویی با استفاده از نرم افزار تعریف شده^{۴۲} می‌شود:** مفهوم SDN^{۴۳} که مبنی بر جداسازی بخش صفحه ی کنترل CP از صفحه‌ی کاربر UP می‌باشد، در ساختار ORAN مورد بررسی قرار می‌گیرد. این جداسازی منجر به بهبود RRM برای استفاده از زمان غیر واقعی و زمان نزدیک به واقعی در کنترلگر هوشمند شبکه ی دسترسی رادیویی^{۴۴} RIC با استفاده از رابطهای A1 و E2 می‌گردد. همچنین منجر به جداسازی CU از CP/UP می‌شود که از طریق رابط E1 در 3GPP توسعه می‌یابد.

- **مجازی سازی بخش RAN:** ابری سازی RAN یکی از اصول مهم ساختار ORAN می‌باشد. اپراتورها برای پشتیبانی از شکافهای مختلف در شبکه، الزامات NFVI/VIM را برای تقویت سیستم عامل مجازی ارائه می‌دهند. به عنوان مثال: لایه ی بالا بین PDCP و RLC تقسیم می‌شود و لایه ی پایین در PHY تقسیم می‌شود.

- **رابطهای باز:** معماری مرجع ORAN بر روی مجموعه ای از رابطهای کلیدی بین چندین جزء جدا شده ی RAN ساخته شده است. اینها شامل رابطهای 3GPP پیشرفته (Xn, X2, E1, W1, F1) برای قابلیت

⁴¹ Artificial Intelligent

⁴² Software Defined

⁴³ software defined network

⁴⁴ RAN Intelligent Controller

همکاری بین چندین شرکت مختلف تولید کننده است. رابطهای مشخص شده ORAN Alliance شامل یک رابط fronthaul باز بین DU و RRU، رابط E2 و یک رابط A1 بین Orchestration/NMS است که شامل عملکرد غیر واقعی زمانی^{۴۵} و عملکرد gNB / eNB حاوی عملکرد RIC نزدیک به زمان واقعی^{۴۶} است.

• **سخت افزار جعبه سفید:** برای بهره‌مندی کامل از مقیاسی از اقتصاد ارائه شده توسط یک رویکرد محاسباتی باز، O-RAN Alliance طرحهای مرجع سخت افزاری و ایستگاه پایه به صورت جعبه سفید با کارایی بالا را مشخص می‌کند. سیستم عاملهای مرجع از یک رویکرد جدا شده پشتیبانی میکنند و نقشه‌های مفصلی را برای معماری سخت افزار و نرم‌افزار ارائه می‌دهند تا هم BBU و RRU را فعال کنند.

• **نرم‌افزار منبع باز:** اتحادیه ORAN ارزش انجمنهایی که منابع باز ارائه می‌دهند را درک کرده و از آنها پشتیبانی می‌کند. بسیاری از مؤلفه‌های معماری ORAN به صورت منبع باز از طریق جوامع موجود تحویل داده می‌شود. این مؤلفه‌ها عبارتند از: کنترلر هوشمند، RAN پشته پروتکل، پردازش لایه PHY و بستر مجازی سازی. چارچوب نرم‌افزار منبع باز ORAN نه تنها رابطهای (Xn, X2, E2, E1, W1, F1) را پیاده سازی می‌کند، بلکه انتظار دارد که طراحی مرجع را برای نسل بعدی RRM با هوش جاسازی شده ارائه دهد تا RIC را امکان پذیر کند.

ORAN، المانهای شبکه ی دسترسی رادیویی را مجازی می‌کند، آنها را جدا کرده و رابطهای باز مناسب را برای اتصال این عناصر تعیین می‌کند. همچنین، ORAN از روشهای یادگیری ماشین برای هوشمندسازی لایه‌های RAN استفاده می‌نماید. در ساختار نوآورانه ی ORAN نرم‌افزار قابل برنامه ریزی RAN از سخت افزار جدا می‌شود. یکی از مهم ترین خصوصیات ORAN رابط کاربری باز است که به اپراتورهای موبایل این قابلیت را می‌دهد تا بتوانند سرویسهای مورد نیاز خود را تعریف نمایند.

در ساختار ORAN، واحد توزیع شده DU، نود منطقی می‌باشد که شامل لایه‌های RLC، MAC، و High-PHY است. علاوه بر این، واحد مرکزی CU نود منطقی است که شامل لایه‌های RRC، SDAP و PDCP می‌باشد. نود منطقی واحد رادیویی RU نیز، شامل لایه ی LOW-PHY و بخش پردازش رادیویی می‌باشد. ORAN، رابطهایی از جمله رابط fronthaul باز را شامل می‌شود که بخش DU را به RU متصل می‌نماید (رابط E2). همچنین رابط A1 بین orchestration/NMS که شامل تابع غیر واقعی زمان است و eNB/qNB که شامل تابع نزدیک به زمان است.

⁴⁵non real time RIC

⁴⁶near-real time RIC

با افزایش ترافیک تلفن همراه، شبکه‌های تلفن همراه و تجهیزاتی که آنها را اجرا می‌کند باید نرم‌افزاری تر، مجازی، انعطاف پذیر، هوشمند و کارآمدتر شوند. اتحادیه ی ORAN متعهد است در حال تکامل شبکه‌های دسترسی رادیویی باشد که باعث می‌شود آنها نسبت به نسل‌های قبل بازتر و باهوش تر شوند. تجزیه و تحلیل در زمان واقعی که توسط سیستم‌های یادگیری ماشین تعبیه شده است و ماژول‌های پایانی هوش مصنوعی را هدایت می‌کند، باعث تقویت هوش شبکه شود. عناصر شبکه مجازی با رابط‌های باز و استاندارد، جنبه‌های اصلی طرح‌های مرجع توسعه یافته توسط اتحادیه ی ORAN خواهد بود. فن آوری‌های موجود از عناصر شبکه منبع باز و جعبه سفید، نرم‌افزار و اجزای سخت افزاری مهم این طرح‌های مرجع خواهد بود.

۳.۱ مجازی سازی توابع شبکه

برای بهبود سرویس دهی در نسل پنجم مخابرات، جداسازی المانهای نرم‌افزاری و سخت افزاری شبکه صورت گرفته است و به عنوان مجازی سازی توابع شبکه (NFV) ^{۴۷} معرفی شده است. حال توابع شبکه ی مجازی VNF ^{۴۸}، بلوکهای توابع سیستم هستند. در نسل پنجم مخابرات انتظار می‌رود که میزبان چندین سرویس با نیازهای مختلف به طور همزمان باشند. ایده اصلی NFV جداسازی تجهیزات شبکه فیزیکی از توابع اجرا شده بر روی آنها است. این بدان معنی است که یک عملکرد شبکه - مانند فایروال - میتواند به عنوان نمونه ای از نرم‌افزارهای ساده به فراهم آورندگان سرویس (SP) ^{۴۹} ارسال شود. این امر امکان ادغام بسیاری از انواع تجهیزات شبکه بر روی سرورهای با حجم بالا، سوئیچها و انبارها را فراهم می‌کند، که میتوانند در مراکز داده، نودهای شبکه توزیع شده و در محل کاربر نهایی قرار بگیرند. به این ترتیب، یک سرویس خاص میتواند به مجموعه ای از توابع شبکه مجازی (VNFs) تجزیه شود، که میتواند در نرم‌افزارهایی که روی یک یا چند سرور فیزیکی استاندارد در صنعت قرار دارند، اجرا شود. سپس VNF ها ممکن است در مکانهای مختلف شبکه (به عنوان مثال، با هدف معرفی خدمات هدفمند به مشتریان در یک موقعیت جغرافیایی خاص) جابجا شده و خدمات رسانی کنند، بدون اینکه لزوماً به خرید و نصب سخت افزار جدید نیاز داشته باشند. NFV به ها SP با انعطاف پذیری بیشتری وعده می‌دهد تا بتواند بیشتر قابلیت‌ها و خدمات شبکه خود را به کاربران و سایر خدمات باز کنند و امکان استقرار یا پشتیبانی از سرویسهای جدید شبکه را به طور سریعتر و ارزانتر داشته باشند تا بتوانند سرویس بهتری داشته باشند. برای دستیابی به این مزایا، NFV مسیر را برای کاهش اختلافات در نحوه ارائه خدمات شبکه در مقایسه با عملکرد فعلی ایجاد می‌کند. خلاصه این ویژگیها به شرح زیر است [۱۶].

⁴⁷ network function virtualization

⁴⁸ Virtual network function

⁴⁹ Service Provider

• **جداسازی بخش نرم‌افزار از سخت‌افزار:** از آنجا که عنصر شبکه، ترکیبی از سخت‌افزارها و نرم‌افزارهای یکپارچه نخواهد بود، تکامل هر دو مستقل از یکدیگر می‌باشد. که این ویژگی منجر به جداسازی زمان بندی توسعه و نگهداری نرم‌افزار و سخت‌افزار می‌گردد.

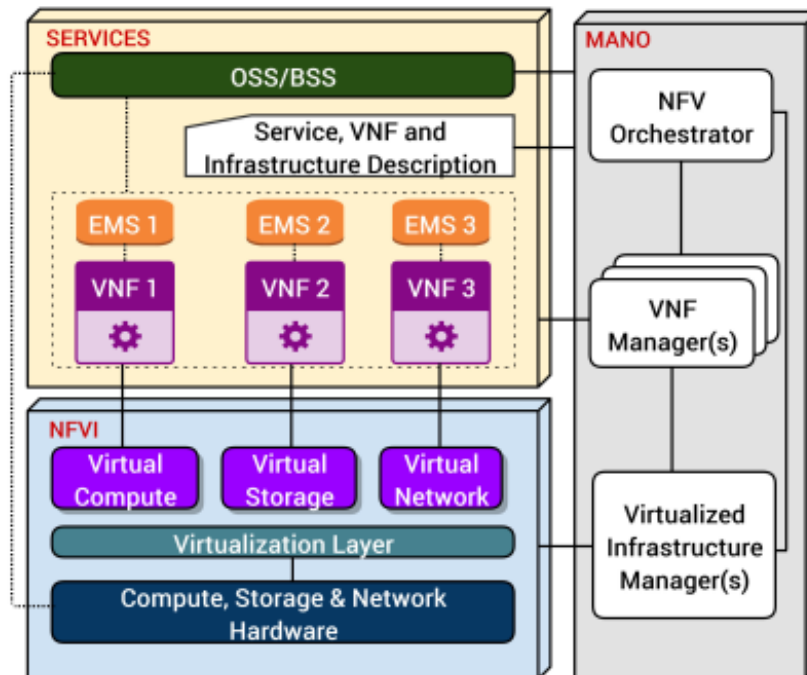
• **استقرار عملکرد شبکه انعطاف پذیر:** جدا کردن نرم‌افزار از سخت‌افزار به تنظیم مجدد و به اشتراک گذاری منابع زیرساختی کمک می‌کند، بنابراین، سخت‌افزار و نرم‌افزار، باهمدیگر میتوانند در زمانهای مختلف عملکردهای مختلفی را انجام دهد که به اپراتورهای شبکه کمک می‌کند تا خدمات جدید شبکه را سریعتر در همان پلت فرم فیزیکی مستقر کنند. بنابراین، مؤلفه‌ها را میتوان در هر دستگاه با قابلیت NFV در شبکه قرار داد و اتصالات آنها به روشی انعطاف پذیر تنظیم کرد.

• **مقیاس گذاری پویا:** جدا کردن عملکرد شبکه به اجزای نرم‌افزاری انعطاف پذیری بیشتری را برای عملکرد واقعی VNF به روشی پویاتر، با توجه به ترافیک واقعی که اپراتور شبکه برای تأمین ظرفیت نیاز دارد، فراهم می‌کند.

در ادامه ساختار این شبکه به طور دقیق بیان می‌گردد. VNF ها برای به اشتراک گذاشتن منابع مختلف فیزیکی و مجازی زیرساختها میتوانند مستقر و مجدداً تنظیم شوند، تا مقیاس پذیری و کارآمدی سیستم را تضمین کنند که منجر می‌شود SPها به سرعت سرویسهای جدید را در سیستم وارد کنند. به طور کلی، سه مؤلفه اصلی در NFV وجود دارد: خدمات، NFVI و مدیریت NFV و orchestration^{۵۰} که در شکل (۱۰.۱) دیده می‌شود. این مؤلفه‌ها به شرح زیر بیان می‌گردد [۷].

۱. خدمات: یک سرویس مجموعه ای از VNF ها است که میتوانند در یک یا چند ماشین مجازی پیاده سازی شوند. در بعضی مواقع، VNF ها میتوانند در ماشینهای مجازی نصب شده در سیستم عامل یا سخت افزار بطور مستقیم نصب شوند. آنها توسط سرپرستان بومی یا مانیتورهای ماشین مجازی اداره می‌شوند. معمولاً توسط یک سیستم مدیریت عناصر^{۵۱}، (EMS) که مسئولیت ایجاد، تنظیمات، نظارت، عملکرد و امنیت آن است، اداره می‌شود. EMS اطلاعات ضروری مورد نیاز سیستم پشتیبانی عملیات^{۵۲} (OSS) را در یک محیط SP فراهم می‌کند. OSS سیستم مدیریت عمومی است، که همراه با سیستم پشتیبانی از تجارت^{۵۳} (BSS)، به ارائه دهندگان کمک می‌کند تا چندین سرویس ارتباطی از راه دور را به کار ببندند و مدیریت کنند. (به عنوان مثال سفارش، صورتحساب، تمدید، عیب یابی مشکل و غیره). مشخصات NFV بر ادغام با راه حل‌های موجود BSS / OSS متمرکز است.

⁵⁰NFV-MANO⁵¹Element Management System⁵²Operations Support System⁵³Business Support System



شکل ۱۰.۱: ساختار NFV [۷]

۲. NFVI: زیرساخت‌های NFV تمام منابع سخت افزاری و نرم‌افزاری را که شامل محیط NFV است، پوشش می‌دهد. NFVI شامل اتصال شبکه بین مکانها، به عنوان مثال، بین مراکز داده و ابرهای ترکیبی عمومی یا خصوصی است. منابع فیزیکی به طور معمول شامل محاسبات، ذخیره سازی و سخت افزار شبکه است که وظیفه ی آن پردازش، ذخیره سازی و اتصال ه‌های VNF از طریق لایه مجازی سازی است و دقیقاً بالای سخت افزار قرار دارد و منابع فیزیکی را چکیده می‌کند (که به صورت منطقی تقسیم شده و به ه‌های VNF اختصاص می‌یابد). هیچ راه حل خاصی برای استقرار NFV وجود ندارد. در عوض معماری NFV میتواند از یک لایه مجازی سازی موجود مانند Hypervisor با ویژگیهای استاندارد که منابع سخت افزاری را به راحتی استخراج می‌کند و آنها را به ه‌های VNF اختصاص می‌دهد، استفاده کند. وقتی این پشتیبانی در دسترس نباشد، اغلب، لایه مجازی سازی از طریق یک سیستم عامل حاصل می‌شود که نرم‌افزاری را در بالای سرور غیر مجازی یا با اجرای یک VNF به عنوان یک برنامه اضافه می‌کند.

۳. NFV-MANO: NFV-MANO از این موارد تشکیل شده است: orchestrator، مدیران VNFs و مدیران زیرساخت مجازی. چنین بلوکی عملکردهای مورد نیاز برای کارهای مدیریتی را که برای ه‌های VNF اعمال می‌شود، به عنوان مثال تهیه و پیکربندی را ارائه می‌دهد. NFV-MANO شامل orchestration

و مدیریت چرخه منابع فیزیکی یا مجازی است که از مجازی سازی زیرساختها و مدیریت چرخه ها VNF پشتیبانی می‌کند. همچنین شامل بانکهای اطلاعاتی است که برای ذخیره اطلاعات و مدل‌های داده استفاده می‌شود که ویژگیهای چرخه عمر توابع، خدمات و منابع را تعریف می‌کند. NFV-MANO روی کلیه وظایف مدیریتی مجازی سازی ویژه لازم در چارچوب NFV تمرکز دارد. علاوه بر این، این چارچوب رابطهایی را تعیین می‌کند که میتوانند برای ارتباطات بین مؤلفه‌های مختلف NFV، MANO و همچنین هماهنگی با سیستمهای سنتی مدیریت شبکه (یعنی OSS و BSS مورد استفاده قرار گیرند تا امکان عملکرد هر دو VNF و کارکردهای اجرا شده بر روی تجهیزات فراهم شود. به طور خلاصه، اگر برش شبکه با استفاده از فایروال و DPI مستقر شده باشد، آنگاه NFV-MANO وظیفه دارد بگوید این ها VNF در کجای شبکه فیزیکی قرار دارند. همچنین این ها VNF توسط EMS و همان MANO کنترل می‌شوند.

۴.۱ زیرساخت تعریف شده توسط نرم افزار

زیرساخت تعریف شده توسط نرم افزار (SDI)^{۵۴} تعریفی از زیرساختهای محاسبات فنی است که کاملاً تحت کنترل نرم افزار بدون دخالت اپراتور یا انسان است. این عمل مستقل از هرگونه وابستگی خاص سخت افزاری عمل می‌کند و از لحاظ برنامه قابل توسعه است. در رویکرد SDI، الزامات زیرساختی یک برنامه به صورت الزامات کاربردی و غیر عملکردی تعریف شده است به گونه‌ای که می‌توان به طور خودکار سخت افزار کافی و مناسب برای تحقق این نیازها تهیه کرد. این زیرساخت شامل شبکه‌ی تعریف شده‌ی نرم افزار و شبکه‌ی رادیویی دسترسی تعریف شده‌ی نرم افزار می‌باشد که در ادامه توضیح می‌دهیم.

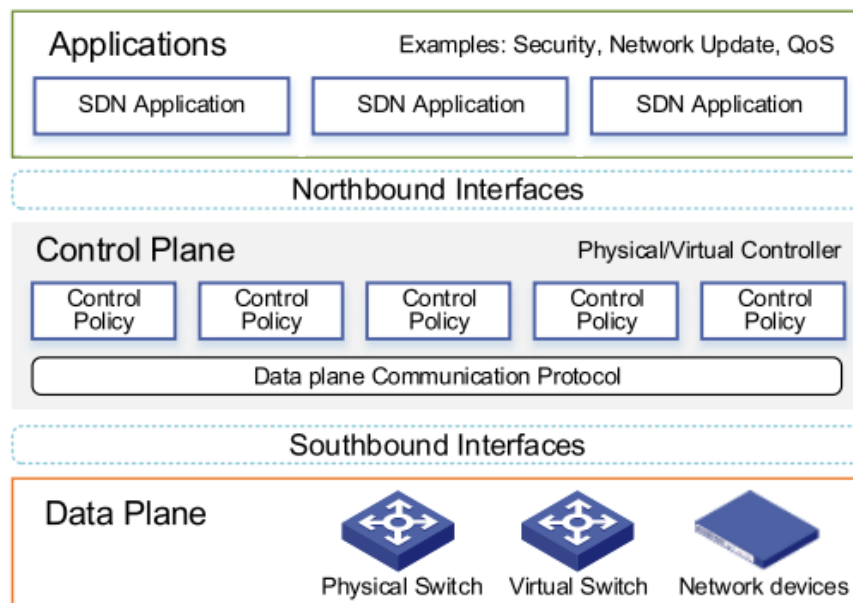
۱.۴.۱ شبکه تعریف شده نرم افزار (SDN)

بنیاد شبکه باز^{۵۵} (ONF) یک مجموعه ای است که به توسعه، استاندارد سازی و تجاری سازی SDN^{۵۶} پرداخت. ONF به طور صریح و دقیق SDN را بدین صورت تعریف کرد: شبکه تعریف شده توسط نرم افزار (SDN) یک معماری شبکه است که کنترل شبکه از ارسال جدا می‌شود و به طور مستقیم قابل برنامه ریزی است. SDN توسط دو ویژگی تعریف می‌شود، یعنی جدا شدن صفحه ی کنترل و داده و قابلیت برنامه ریزی در صفحه کنترل. با این وجود، هیچ یک از این دو امضای SDN در معماری شبکه کاملاً جدید نیستند [۱۷]. SDN در اصل یک الگوی

^{۵۴}Software Defined Infrastructure

^{۵۵}Open Networking Foundation

^{۵۶}Software Defined Network



شکل ۱۱.۱: ساختار SDN [۸]

شبکه سازی متمرکز است که در آن هوش شبکه (یعنی عملکرد کنترل یا صفحه کنترل) به طور منطقی در یک یا مجموعه ای از موجودیتهای کنترل (یعنی کنترل کننده های SDN) متمرکز می شود در حالی که صفحه ی انتقال داده، ساده و چکیده شده برای برنامه های کاربردی می باشد و سرویسهای شبکه درخواست خود را از طریق کنترل کننده های SDN بیان میکنند. در حالی که در مورد هسته اصلی شبکه موبایل، EPC LTE صحبت میکنیم، مفهوم SDN برای دستیابی به جدایی واضح بین صفحات کنترل و کاربر در اشخاص SGW و PGW استفاده می شود. با تقسیم دروازه به این روش (یعنی از SGW به SGW-C و SGW-U و از PGW به PGW-C و PGW-U) مقیاس بندی این مؤلفه ها به طور مستقل امکان پذیر است و طیف وسیعی از گزینه های استقرار را نیز ممکن می کند.

پروتکل مورد استفاده بین صفحه ی کنترل و صفحه ی کاربر میتواند یا افزونه پروتکل موجود OpenFlow باشد، که توسط گروه کاری بی سیم و موبایل ONF با (WMWG) رابطهای جدید، یعنی Sxa و Sxb ساخته می شود، که توسط 3GPP CUPS تعریف و مشخص می شوند [۱۸]. جداسازی صفحه ی کنترل از کاربر منجر به کنترل بیشتر شبکه بوسیله ی برنامه می گردد که منجر به بهبود تنظیمات و کارآمدی سیستم می گردد. SDN با ساختار برنامه ریزی شده ی قوانین ترافیک، جایگزین امیدوار کننده ای برای فرماندهی ترافیک ارائه می دهد. ساختار SDN در شکل (۱۱.۱) آورده شده است. در این ساختار ۳ لایه ی مختلف وجود دارد که در ادامه بیان میکنیم [۸].

۱. لایه‌ی برنامه: این لایه مجموعه‌ای از برنامه‌های متمرکز بر خدمات شبکه را پوشش می‌دهد و آنها عمدتاً برنامه‌های نرم‌افزاری هستند که با لایه کنترل ارتباط برقرار میکنند.

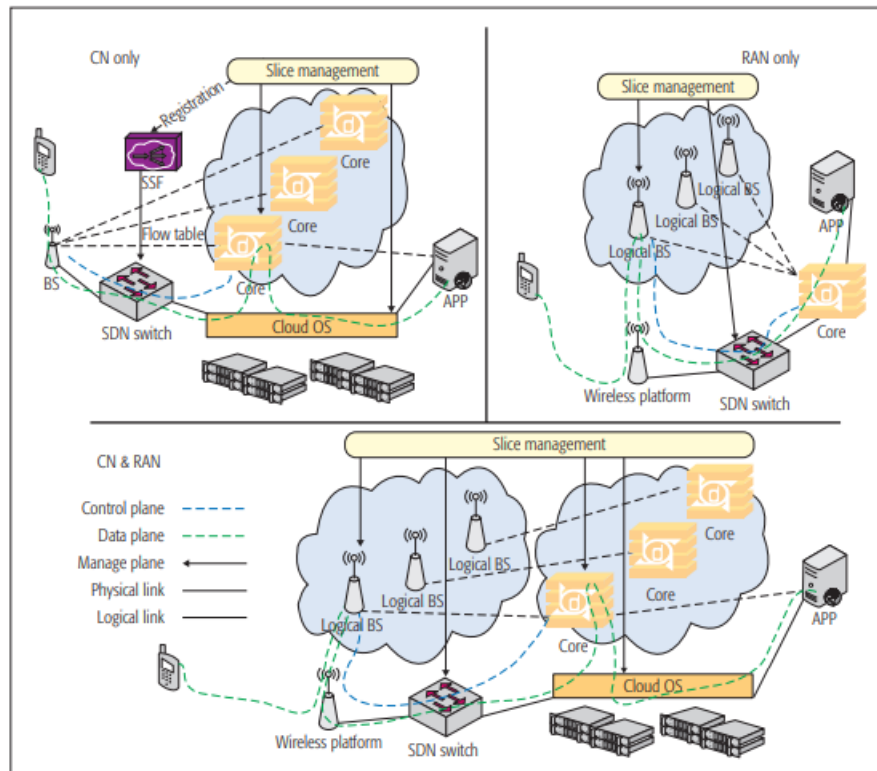
۲. لایه‌ی کنترل: به عنوان هسته اصلی، SDN لایه کنترل از یک کنترلر متمرکز تشکیل شده است که منطقاً نمای شبکه جهانی و پویا را حفظ می‌کند، که از لایه برنامه درخواست می‌کند و دستگاه‌های شبکه را از طریق پروتکل‌های استاندارد مدیریت می‌کند.

۳. لایه‌ی داده: این لایه، زیرساختها شامل سوئیچها، روترها و لوازم شبکه می‌باشد. در زمینه SDN، این دستگاه‌ها قابل برنامه ریزی هستند و از رابط‌های استاندارد پشتیبانی میکنند.

۲.۴.۱ شبکه دسترسی رادیویی تعریف شده نرم‌افزار (SDRAN)

SDRAN^{۵۷} یا شبکه‌ی دسترسی رادیویی تعریف شده‌ی نرم‌افزار، یک بازنگری اساسی در لایه دسترسی رادیویی است. SDRAN یک صفحه‌ی کنترل متمرکز نرم‌افزار تعریف شده است برای بخش شبکه دسترسی رادیویی که ایستگاه‌های پایه را در یک مکان جغرافیایی داخلی، به عنوان یک ایستگاه پایه‌ی بزرگ مجازی با المانهای کنترلی مرکزی و رادیویی می‌باشد. در این حالت، مفهوم SDRAN به مفهوم vRAN بسیار نزدیک است. SDRAN صفحه کنترل و صفحه داده را در RAN جدا می‌کند و تصمیمات کنترل را به صفحه کنترل متمرکز می‌کند. در معماری های رایج، SDRAN یک کنترل کننده مرکزی اطلاعات کل شبکه را جمع می‌کند و در سطح کلی برای هر عنصر صفحه داده تصمیم گیری می‌کند. این روش از سربار شدن تصمیم گیری در عناصر صفحه داده جلوگیری می‌کند و فرصتی را برای مدیریت انعطاف پذیر و هماهنگ در کل RAN فراهم می‌کند. در تعریف چنین معماری، ما چارچوبی ایجاد می‌کنیم که از طریق آن یک شبکه جغرافیایی محلی می‌تواند به طور موثر توازن بار و مدیریت تداخل را انجام دهد و همچنین نرخ عملیاتی و یا هر هدف دیگر را به بهینه‌ترین مقدار خود برساند. ما معتقدیم که طراحی تعریف شده توسط نرم افزار در RAN یک گام اساسی برای پشتیبانی از برش شبکه، به اشتراک گذاری، RAN مدیریت طیف انعطاف پذیر و سایر ویژگی های اصلی در شبکه های ۵G خواهد بود. امید بر این است که طراحی تعریف شده توسط نرم افزار در RAN (SDRAN) یک گام اساسی برای پشتیبانی از برش شبکه، به اشتراک گذاری، RAN مدیریت طیف انعطاف پذیر و سایر ویژگی های اصلی در شبکه های ۵G خواهد بود [۱۹، ۲۰].

⁵⁷Software Defined Radio Access Network



شکل ۱۲.۱: سه ساختار برش شبکه [۹]

۵.۱ برش شبکه

پیش‌بینی می‌شود شبکه‌های 5G چندین سرویس را با نیازهای مختلف به طور همزمان پشتیبانی کند. برش شبکه ^{۵۸} به عنوان راه‌حلی برای چنین تقاضا در نظر گرفته شده است. یک برش شبکه، یک شبکه منطقی end-to-end است که خدمات با نیازهای خاص را ارائه می‌دهد. چندین برش شبکه در یک زیرساخت یکسان اجرا و مدیریت می‌شوند و به طور مستقل کار می‌کنند. برش شبکه با هدف تقسیم منطقی مجموعه توابع و منابع شبکه در یک نهاد شبکه در نظر گرفته شده است که مطابق با خواسته‌های فنی یا تجاری خاص می‌باشد. با خرد کردن یک شبکه فیزیکی به چندین شبکه منطقی، برش شبکه می‌تواند از خدمات متناسب با تقاضا برای سناریوهای برنامه مشخص در همان زمان با استفاده از همان شبکه فیزیکی پشتیبانی کند. با استفاده از برش شبکه، منابع شبکه می‌توانند به صورت پویا و کارآمد به برشهای شبکه منطقی با توجه به خواسته‌های QoS مربوطه اختصاص داده شوند [۲۱].

پیاده‌سازیهای مختلفی از برش شبکه وجود دارد که شامل برش هسته‌ی شبکه، برش RAN و برش هر دو بخش می‌باشد [۹].

⁵⁸Network Slicing

- **برش هسته:** هسته ی شبکه (CN) ^{۵۹} به عنوان برشهای شبکه، مجازی سازی می‌شوند که با ویژگیهایی مانند ویژگیهای قابل برنامه ریزی و قابل اعتماد بودن که شامل مدیریت حرکت و تأیید اعتبار می‌باشد. برشهای شبکه فقط در CN وجود دارد. بنابراین، نه RAN و نه تجهیزات کاربر (UE) برای های CN برش داده شده نیاز به تنظیم ویژه ندارند. در برش هسته ی شبکه، برش تنها در بخش هسته ی شبکه است و تمام واسطها و فرایندها، بدون تغییر باقی میمانند به جز مواردی که در ابتدا هاه UE به شبکه‌ها وصل می‌شوند، زیرا هاه UE باید به برش صحیح هاه CN اختصاص داده شوند.
- **برش شبکه ی دسترسی رادیویی:** برخلاف برش، CN برشهای RAN روی سخت افزار رادیویی و استخر منابع باند پایه، به نام یک سطح بی سیم، اجرا می‌شوند که دارای کشش کمتری نسبت به زیرساخت مجازی بالغ شده در هاه CN هستند. با چند BS منطقی، برشهای RAN پارامترهای مختلفی از رابطهای هوا (به عنوان مثال، طول نماد، فاصله زیر حامل، طول پیشوند چرخه و پارامترهای درخواست تکرار خودکار هیبریدی ^{۶۰}) را اعمال می‌کند. علاوه بر این، پارامترهای دیگری مانند انتخاب سلول و آستانه انتقال، و همچنین سیاستهای انتقال هماهنگ را میتوان برای هر برش تعریف کرد تا یک تجربه بی سیم برجسته را به کاربران ارائه دهد.
- **برش هسته و شبکه ی دسترسی رادیویی:** در این سناریو، هر برش از RAN به یک برش از هسته متصل می‌شود، بنابراین اپراتورها میتوانند یک شبکه منطقی انتهای به مشتریان ارائه دهند. روش انتخاب برش همان روش برش RAN است، بنابراین کاربران پس از دسترسی به سیستم، نیازی به انتخاب برش CN ندارند. این مدل از برش مزایای هر دو مدل از برش را باهم دارد. در نتیجه این روش برش، قادر به برنامه ریزی ویژگیهای CN و همچنین دارای قابلیت تغییر رابطهای هوایی RAN می‌باشد.

۶.۱ مسئله ی کوله‌پشتی و بسته‌بندی جعبه

در اینجا به دو مسئله ی کوله‌پشتی و بسته‌بندی جعبه می‌پردازیم. این دو مسئله NP-Hard هستند. مسئله ی NP-hard را نمی‌توان در زمان چند جمله‌ای حل کرد و نیاز به روش ابتکاری است. در ادامه به بررسی این دو مسئله می‌پردازیم.

⁵⁹core network

⁶⁰HARQ

۱.۶.۱ مسئله‌ی کوله‌پشتی

یکی از مسائل NP-Hard، مسئله‌ی کوله‌پشتی^{۶۱} می‌باشد. در این مسئله می‌خواهیم تعدادی شی با وزنهای مختلف را در تعدادی جایگاه با ظرفیت مشخص قرار دهیم. هدف در این مسئله قرارگیری بیشترین تعداد اشیاء در این جایگاه‌ها می‌باشد. حل این مسئله با استفاده از روش‌های مختلف صورت می‌گیرد. این مسئله بدین صورت فرمول بندی می‌شود.

$$\max_x \sum_{j=1}^N p_j x_j \quad (1.1.1)$$

$$\text{subject to} \quad \sum_{j=1}^N r_{i,j} x_j \leq b_i \quad i = 1, \dots, m, \quad (1.1.2)$$

$$x_j \in \{0, 1\} \quad (1.1.3)$$

که در اینجا، m شرط، شرطهای کوله‌پشتی می‌باشد. در نتیجه این مسئله، کوله‌پشتی بعدی m می‌باشد [۲۲]. p_j ارزش گزاری شی j ام می‌باشد. همچنین برای حل این مسائل از الگوریتمهای branch-and-bound و cutting-plane و الگوریتمهای ابتکاری استفاده می‌شود.

۲.۶.۱ مسئله‌ی بسته‌بندی جعبه

در این مسئله هدف قرار دادن تعدادی شیء در تعدادی جعبه با ظرفیت مشخص می‌باشد. در مسئله‌ی بسته‌بندی جعبه^{۶۲} هدف کمینه کردن تعداد جعبه‌های ورودی با فرض اینکه همه‌ی اشیاء در آن جا شوند. حل این مسئله با استفاده از روش‌های مختلف صورت می‌گیرد. این مسئله بدین صورت فرمول بندی می‌شود.

$$\min_x \quad K = \sum_{j=1}^n y_j \quad (2.1.1)$$

$$\text{subject to} \quad K \geq 1 \quad (2.1.2)$$

$$\sum_{j=1}^n x_{ij} = 1 \quad i = 1, \dots, m, \quad (2.1.3)$$

⁶¹knapsack⁶²bin packing

$$\sum_{i=1}^m r_i x_{ij} \leq b_j \quad j = 1, \dots, n \quad (2.1)$$

$$x_{ij} \in \{0, 1\} \quad y_j \in \{0, 1\} \quad \forall i, j \quad (2.1)$$

در اینجا، y_j تعداد جعبه‌های مورد استفاده است که در صورتی که $\sum_{i=1}^n x_{ij} \geq 1$ باشد، مقدار ۱ می‌گیرد. x_{ij} نشان می‌دهد که شی i در جعبه‌ی j جا دارد. و در غیر این صورت ۰ است [۲۳].

۷.۱ دستاوردهای پروژه

در اینجا، هدف در نظریه‌ی ساختار رادیویی دسترسی باز در نسل پنجم و تخصیص منابع آن می‌باشد. مسئله‌ی برش شبکه در بخش رادیویی و قرارگیری توابع مجازی شبکه بر روی مراکز داده باهم در شبکه‌ی دسترسی رادیویی باز مورد بررسی قرار گرفته است. بخش رادیویی به صورت کانل مدل سازی شده و تاخیر و نرخ و پارامترهای دیگر بدست می‌آید. در اینجا فرض بر این است که کاربران بر اساس سرویس مورد نیاز، دسته بندی می‌شوند و هدف تخصیص برشهای شبکه به سرویسهاست و سپس تخصیص منابع فیزیکی محاسباتی به این برشهای اختصاص یافته به سرویسها می‌باشد. برای حل این مسئله، ابتدا مسئله را به دو مسئله‌ی کوچکتر مختلف شکسته که در بخش اول، تخصیص برش شبکه به کاربران سرویسها و تخصیص توان در ساختار رادیویی باز حل شده و پس از آن، برشهایی از شبکه که به سرویس اختصاص داده شده را به مراکز داده نگاشت می‌دهیم. در این مسئله، تاخیر و نرخ هر کاربر در سرویس مورد بررسی قرار گرفته شده و چالش تخصیص منابع که شامل برش بخش رادیویی به هر سرویس است و جاگیری توابع شبکه حل می‌شود. الگوریتم بهینه با استفاده از MOSEK و CVX بدست می‌آید، و الگوریتم استفاده شده در مسئله، یک روش ابتکاری و از جنس الگوریتمهای حریص می‌باشد. این مسئله به صورت متمرکز حل شده است. سپس مسئله به صورت ساده‌تر به دو مسئله‌ی بسته‌بندی جعبه و کوله‌پشتی نوشته شده و برای حالت دینامیکی متغیر با زمان با روش یادگیری تقویتی حل می‌شود.

۸.۱ ساختار پروژه

در این فصل مروری بر مفاهیم مورد استفاده در پروژه کردیم در فصل دوم مروری بر ادبیات پیشین و خلاصه‌ای از مدل سیستم مقالات موجود، بیان می‌گردد. در این فصل ابتدا صورت مسئله‌ی برش شبکه، شبکه‌های دسترسی

رادیویی باز و قرارگیری توابع شبکه در مراکز داده بررسی کرده سپس در مورد حل مسئله به روش دینامیکی صحبت می‌کنیم. در فصل سوم مدل سیستم در نظر گرفته بیان می‌شود و صورت مسئله به نمایش گذاشته می‌شود و روشهای حل آن بیان می‌گردد. همچنین نتایج شبیه سازی قرار داده می‌شود. در فصل چهارم در صورت مسئله را ساده سازی کرده و با روش دینامیکی حل می‌نماییم. در فصل پنجم نیز نتیجه گیری و کارهای آتی مورد نظر و پیشنهادات بیان می‌شود.

۹.۱ نتیجه گیری

در این فصل ابتدا مروری بر تاریخچه ی مخابرات و ۵ نسل مخابراتی شد. سپس ساختارهای مختلف دسترسی رادیویی به طور خلاصه بیان شد و در نتیجه ی آن ساختار CRAN که ساختار ابری است تعریف شد. سپس ساختار xRAN مورد توجه قرار گرفت و در نهایت ساختار ORAN که ترکیب و تکاملی از CRAN و xRAN می‌باشد مورد توجه قرار گرفت.

بعد از بیان ساختارهای رادیویی، ساختار هسته ی شبکه را در نسل پنجم بیان کردیم که شامل SDN و NFV می‌باشد که منجر به جداسازی صفحه ی کنترل از کاربر می‌شود و سیستم هوشمندتر همراه با قابلیت برنامه ریزی بیشتر می‌گردد. در ادامه برش شبکه در بخش رادیویی و هسته و هردو مورد توجه قرار گرفته شد. سپس در مورد دو مسئله ی NP-Hard صحبت نمودیم. در نهایت در مورد دستاوردهای پروژه و ساختار فصلهای آتی صحبت می‌نماییم.

فصل ۲

مروری بر کارهای پیشین

۱.۲ مقدمه

در این فصل، به مرور کارهای گذشته می‌پردازیم. ابتدا صورت مسئله مقالات مختلف را بررسی می‌نماییم که به ترتیب شامل مقالاتی هستند که از برش شبکه استفاده کرده‌اند. برش شبکه در سه بخش رادیویی، بخش هسته و هر دو بخش هسته و رادیویی صورت می‌گیرد. سپس در زمینه‌ی سیر عبور از شبکه‌های دسترسی رادیویی ابری به شبکه‌های دسترسی رادیویی باز مطالعه نموده و بعد از آن درباره‌ی جاگیری VNF ها صحبت می‌کنیم. سپس در مورد روش حل مسئله صحبت می‌کنیم که شامل مسائل کوله پستی و بسته بندی جعبه می‌باشد و در نهایت در مورد روشهای یادگیری تقویتی صحبت می‌کنیم.

۲.۲ مروری بر مسائل پیشین

در این بخش به مطالعه‌ی مقالات متشابه می‌پردازیم. ابتدا در مورد مسائل مرتبط با برش شبکه صحبت نموده سپس در مورد شبکه‌های دسترسی رادیویی باز مطالعه نموده و در نهایت به مروری بر کارهای انجام شده در زمینه‌ی قرارگیری توابع شبکه‌ی مجازی می‌پردازیم.

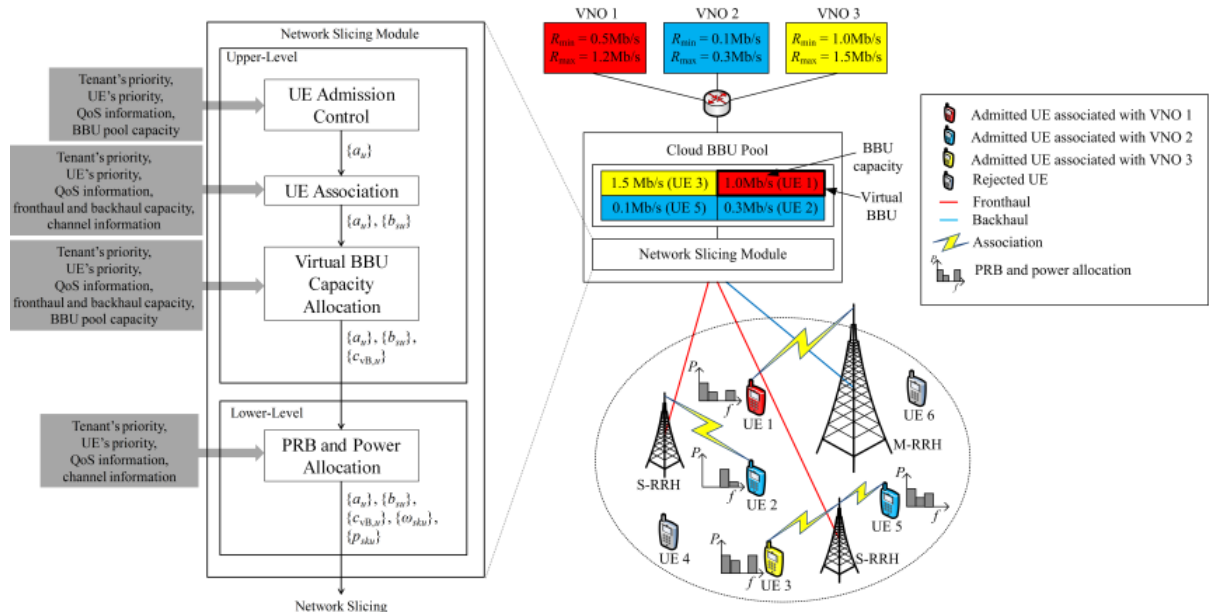
۱.۲.۲ برش شبکه

برش شبکه یک شبکه منطقی انتها به انتهای مستقل است که بر روی یک زیرساخت فیزیکی مشترک کار و قادر به ارائه خدمات می‌باشد. در این بخش برش شبکه در بخش رادیویی و هسته و هردو را بررسی می‌کنیم. برش RAN یکی از کلیدهای اصلی برای انعطاف پذیری سفارشات و مدیریت مجازی سازی ایستگاه پایه می‌باشد تا بتواند منابع رادیویی را در میان سرویس‌های مختلف تقسیم کرده و منجر به سازگاری اپراتورها و برطرف کردن نیاز سرویس‌ها گردد.

شبکه‌های دسترسی رادیویی ابر (C-RAN) به عنوان یک چارچوب امیدوار کننده برای سیستم‌های ارتباط بی سیم نسل پنجم ظاهر شده‌اند. از آنجا که آنها می‌توانند پیچیدگی رمزگشایی، مصرف انرژی و دخالت‌های ناشی از افزایش تراکم تلفن همراه را کاهش دهند [۲۴]. در ادامه در مورد برش شبکه در بخش رادیویی شبکه‌های دسترسی رادیویی ابری صحبت می‌کنیم.

در مقاله‌ی [۱۰] برش شبکه به صورت دینامیکی در بخش رادیویی مورد بررسی قرار گرفته شده‌است. برش شبکه در اینجا به عنوان فرآیند تخصیص منابع شبکه به کاربران انجام چارچوب طرح برش شبکه شامل یک سطح بالاتر، که مدیریت کنترل پذیرش کاربران، ارتباط کاربر که شامل تخصیص واحد رادیویی (RRH) برای بیشینه سازی نرخ کاربران و تخصیص ظرفیت منابع باند پایه (BBU) و یک سطح پایین تر، که تخصیص توان و بلوک منابع فیزیکی (PRB) در میان کاربران می‌باشد. در این مدل فرض می‌کنیم که هر سرویس دارای شبکه اصلی خود (یا قطعه اصلی شبکه) است که به H-CRAN متصل می‌شود. سلول بزرگ RRH (M-RRH) و سلولهای کوچک RRHs (S-RRHs) به ترتیب از طریق پیوندهای پشتی و fronthaul به یک استخر ابر BBU متصل میشوند. همچنین، تقسیم C/U در مدل سیستم فرض می‌شود، که به موجب آن صفحات کنترل و داده از هم جدا میشوند به گونه ای که صفحات کنترل توسط M-RRH در شبکه مدیریت می‌شود. همانطور که در شکل (۱.۲) مشخص شده‌است ابتدا پذیرش کاربر مورد توجه قرار می‌گیرد و سپس کاربر به RRH متصل می‌شود و پس از آن ظرفیت BBU به آن تخصیص می‌دهد که تا این بخش از کار در سطح بالا قرار داریم. در سطح بالا، یک مسئله کنترل پذیرش با برنامه نویسی پویا می‌باشد که در آن پیچیدگی را میتوان تنظیم کرد. این مسئله از جنس مسئله ی کوله پشتی^۱ باینری می‌باشد که با الگوریتم دینامیکی جواب بهینه ی آن بدست می‌آید. همچنین مسئله ی ارتباط کاربر نیز یک مسئله ی کوله پشتی باینری است که با استفاده از یک الگوریتم حریص با پیچیدگی کم بهینه و حل می‌شود. مسئله ی تخصیص ظرفیت BBU نیز فرموله شده و با برنامه ریزی خطی حل می‌شود. حال وارد الگوریتم سطح پایین تر می‌شویم که تخصیص توان و منبع فیزیکی می‌باشد. برای مساله ی سطح پایین تر، مشکل تخصیص منابع به عنوان یک مشکل برنامه نویسی mixed-integer غیر محدب است که با استفاده از

¹Knapsack



شکل ۱.۲: روند برش شبکه [۱۰]

روش دوگانه لاگرانژ حل می‌شود.

در مقاله‌ی [۲۵، ۲۶] برش شبکه در شبکه‌های دسترسی رادیویی ابری مورد توجه قرار گرفته است. در بخش fronthaul مشکلاتی از قبیل پیچیدگی شبکه و محدودیت نرخ وجود دارد که در برش شبکه، منجر به بهبود آن می‌شود. علاوه بر این، C-RAN می‌تواند مجازی سازی مجموعه‌ای از توابع RAN را امکان پذیر کرده و راه را برای اصطلاحاً RAN مجازی باز کند. با این کار میتوان چندین شبکه مجازی یا برش ایجاد کرد. مقاله‌ی [۲۵] نشان داده است که استفاده از برش شبکه و برخورداری از سویچ بسته در fronthaul مزایای زیادی را به همراه خواهد داشت که از جمله برخورداری از تقسیمات عملکردی مختلف خواهد بود. همچنین از معایب این کار تاخیر نسبتاً اندکی می‌باشد.

در مقاله‌ی [۲۷] برش شبکه در بخش رادیویی برای ساختار مه^۲ یا F-RAN در نظر گرفته شده است که در آن دو نمونه برش شبکه برای هات اسپات و سناریوهای وسیله نقلیه با زیرساخت مربوط تنظیم می‌شود. به طور خاص، چارچوب برای برش RAN به عنوان یک مشکل بهینه سازی مشترک برای مقابله با ذخیره کردن و انتخاب حالت است. با توجه به خواسته‌های کاربران مختلف و منابع محدود، پیچیدگی مسئله بهینه سازی اصلی بسیار زیاد است و همین امر باعث می‌شود که رویکردهای بهینه سازی سنتی به طور مستقیم سخت باشد. برای مقابله با این معضل، یک الگوریتم یادگیری تقویت عمیق ارائه شده است، که ایده اصلی آن این است که سرور ابر

^۲Fog Radio Access Network

تصمیمات صحیحی را در زمینه ذخیره محتوا و انتخاب حالت برای به حداکثر رساندن عملکرد پاداش در وضعیت کانال پویا و وضعیت حافظه نهان ارائه می‌دهد.

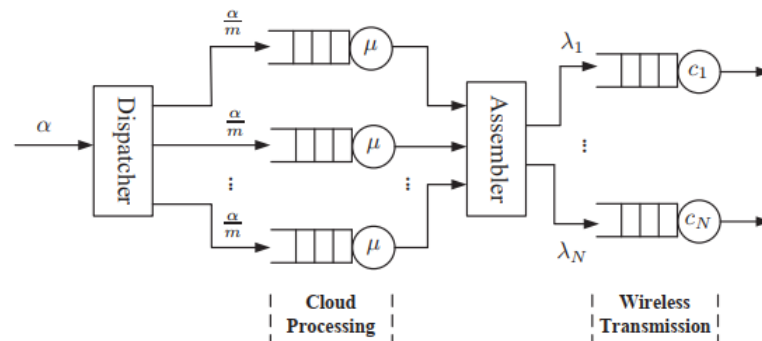
در مقاله‌ی [۲۸، ۲۹] اجرای مفهوم برش در سطح RAN توسط اپراتور شبکه تلفن همراه (MNO) برای پاسخگویی به نیازها می‌باشد. همچنین مساله‌ی تخصیص منابع (در اینجا پهنای باند) مورد توجه قرار گرفته شد. چالش‌های پیش رو برش RAN نیز مورد بررسی قرار گرفته است که یکی از چالش‌ها شامل طراحی و مدیریت چندین برش در زیرساخت مشترک به روشی کارآمد و در عین حال ضمانت SLA توافق شده برای هر یک از آنها است. این چالش ما را نیازمند مفهوم ایزولاسیون برش می‌کند.

در مقاله‌ی [۳۰] برش در بخش RAN مورد توجه قرار گرفته است. همچنین در این مقاله یک برنامه تخصیص منابع پویا، با هدف به طور مشترک بهینه سازی مصرف برق و تخصیص پهنای باند در حالی که رضایت از تأخیر مربوطه برای ورود ترافیک پراکنده uRLLC و کیفیت خدمات eMBB را تا حد ممکن ارائه می‌دهد، پیشنهاد می‌کند. طرح پیشنهادی براساس کنترل بهینه توان برای تخصیص منابع آگاه از تأخیر است. در نتیجه در این سیستم هدف مینیمم کردن توان با شروط برآورده شدن شروط پهنای باند و تأخیر که با شرط صف پردازش نشان داده، می‌باشد.

در مقاله‌ی [۳۱] اجرای عملی برش شبکه پیشنهاد شده است. در مدل پیشنهادی، نویسندگان فرض میکنند که در هر شکاف زمانی مشخص، کاربران فقط میتوانند یک برش شبکه واحد را درخواست کنند. در اینجا تابع هدفی بر اساس نسبت میزان منابع اختصاص داده شده به کاربران در هر زمان t به ظرفیت کل منابع مشخص شده است و هدف بیشینه سازی آن می‌باشد. مدل پیشنهادی بر اساس مسئله multi armed bandit ساخته شده است و نویسندگان سه نوع آن را برای حل جنبه‌های مختلف تخصیص برش شبکه معرفی کرده اند. آنها با استفاده از MATLAB مدل بهینه سازی را شبیه سازی کرده و نتایج را با یک الگوریتم حریص مقایسه کردند. آنها همچنین اثبات مفهوم برش شبکه را ارائه دادند.

برش شبکه یکی از فناوری‌های کلیدی است که به شبکه‌های ۵G اجازه می‌دهد منابع اختصاصی به صنایع مختلف (خدمات) ارائه دهند. در مقاله‌ی [۳۲] نویسندگان یک روش تخصیص منابع (تأخیر بهینه) برای برشهای شبکه حمل و نقل ۵G برای پشتیبانی از خدمات URLLC ارائه داده اند. آنها ویژگی‌های منبع شبکه و ویژگی‌های توپولوژی تخصیص منابع در تقسیم شبکه را معرفی کردند.

در [۳۳، ۳۴] ایزوله کردن برش شبکه‌ی هسته مورد توجه قرار گرفته است. [۳۳] برای کاهش تأثیر حملات DDoS در احراز هویت برش، از ایزوله کردن برش شبکه‌ی هسته استفاده شده و حل آن با ترکیبی از شبیه سازی و یک آزمایش عملی ارزیابی شده است. نویسندگان [۳۴] دو چالش مهم برش شبکه در بخش هسته مورد توجه قرار داده اند که شامل ایزوله کردن برش شبکه و تضمین میزان تأخیر انتها به انتها می‌باشد. در این مقاله، مساله‌ی بهینه سازی به صورت mixed integer linear programming می‌باشد که تابع هدف درخواست‌های برش



شکل ۲.۲: مدل پردازشی شبکه صف [۱۱].

ورودی را به سروری که کمترین میزان استفاده از آن شده است، اختصاص داده و مسیری را با حداقل تأخیر پیدا می‌کند. خروجی این مساله VNF ها را به سرور اختصاص می‌دهد.

در این دسته مقالات، سرویس ها به دو بخش تقسیم میشوند در بخش اول سرویس هایی که نسبت به تأخیر حساسند و دسته ی دوم سرویس هایی که نسبت به نرخ انتقال حساسند. همچنین در برخی مقالات هر دو ویژگی برای یک سرویس مد نظر می‌باشد. در این مدل های سیستم، تأخیر با استفاده از $M/M/1$ در ساده ترین حالت یا برای نزدیک تر شدن به حالت حقیقی از $M/D/1$ نیز استفاده می‌شود. میتوان در این مدل ها تأخیر را کمینه و نرخ انتقال را بیشینه کرده و یا برای کاربران نرخ را از حد مورد نیاز بیشتر و تأخیر را کمتر از حد مورد نیاز فرض کرد [۱۱، ۳۵، ۳۶، ۳۷]. همانطور که در شکل (۲.۲)، مشخص است، در این شبکه برای هر بخش تعدادی VNF قرار دارند که پردازش ها را انجام می‌دهند. در مسیر لینک پایین بسته ها با نرخ α به صف های مختلف وارد شده و پس از پردازش با همدیگر ادغام شده و سپس بسته ی هر کاربر از طریق وایرلس منتقل میشوند. در این پردازش ها، از روش $M/M/1$ استفاده شده است. در این مدل مقالات اشاره ی مستقیم به برش شبکه نشده است ولی در آنها ترکیبی از مفهوم برش RAN و Core به چشم می‌خورد.

۲.۲.۲ شبکه های دسترسی رادیویی باز

در فوریه ۲۰۱۸، شبکه دسترسی رادیویی آزاد (ORAN) با ادغام xRAN و اتحاد C-RAN برای ایجاد سطح جدیدی از باز بودن در شبکه دسترسی رادیویی ایجاد شد که از نسل ۵G و ۶G پشتیبانی می‌کند. هدف اصلی ORAN افزایش عملکرد RAN از طریق عناصر شبکه مجازی و واسطه های باز است که دارای هوش در RAN است. صراحت و هوش دو ستون اصلی تلاشهای انجام شده توسط اتحاد ORAN است که یک نیروی جهانی متشکل از بیش از ۱۶۰ شرکت کننده از فروشندگان بزرگ، شرکت های کوچک و متوسط، اپراتورهای شبکه،

مبتدیان و مؤسسات دانشگاهی است [۳۸].

در مقاله‌ی [۳۹] مقدمه‌ای در مورد مفاهیم، اصول و الزامات Open RAN که توسط اتحاد ORAN مشخص شده، بیان شده‌است. در این مقاله، به منظور نشان دادن نقش هوش در ORAN طرح مدیریت منابع رادیویی هوشمندی را برای رسیدگی به ازدحام ترافیک و نشان دادن اثربخشی آن در یک مجموعه داده در دنیای واقعی پیشنهاد شده‌است. یک معماری سطح بالا از این سناریوی استقرار که سازگار با الزامات ORAN است نیز مورد بحث قرار گرفته است. مقاله با چالشهای کلیدی فنی و مشکلات باز برای تحقیقات و توسعه آینده به پایان میرسد.

در مقاله‌ی [۴۰] تعاریف عمومی، ویژگی‌های اساسی و روند تحقیقاتی فعلی در شبکه‌های دسترسی رادیویی ابری و مشتقات آن، شبکه‌های دسترسی رادیویی مجازی و شبکه‌های دسترسی رادیویی باز ارائه شده‌است. علاوه بر این، نتایج عملی و آموزه‌های آموخته شده در مورد محدودیت‌ها و مسائل پیش‌بینی نشده مجازی سازی شبکه‌های دسترسی رادیویی را ارائه داده شده‌است.

در مقاله‌ی [۴۱، ۴۲] ساختار و مدیریت منابع رادیویی (RRM) هوشمند و همچنین نقش مدیریت لینک رادیویی (RLM) در بهینه سازی انرژی در RRM در نظر گرفته شده‌است. ساختار RLM در زیرساخت ORAN مورد بررسی قرار گرفته است. علاوه بر این، دیدگاه O-RAN و معماری آن مورد توجه قرار گرفته است.

۳.۲.۲ قرار دادن VNF ها

NFV الگویی است که عملکردهای شبکه سنتی را مجازی می‌کند و آنها را در سخت افزارهای عمومی و ابرها در مقابل سخت افزارهای تعیین شده، قرار می‌دهد. در واقع NFV بخش نرم افزار را از سخت افزار جدا می‌نماید. بنابراین یک سرویس داده شده میتواند به مجموعه‌ای از توابع شبکه مجازی (VNF) تجزیه شود، سپس میتوان آن را در نرم افزارهایی که روی یک یا چند سرور استاندارد فیزیکی صنعت اجرا میشوند، پیاده سازی کرد. اپراتورهای شبکه تلفن همراه همراه عهده دار تصمیم گیری مدیریت زیرساخت است. این وظیفه بخشی از تنظیمات شبکه است و شامل تصمیم گیری در مورد قرار دادن VNF های مورد نیاز در سراسر زیرساخت و اختصاص پردازنده، حافظه و منابع ذخیره سازی به VNF ها و مسیریابی داده ها از طریق گره های شبکه می‌باشد. به لطف برش شبکه، شبکه های ۵G از انواع خدمات به روشی انعطاف پذیر و سریع پشتیبانی میکنند. در این زمینه، ما به دنبال تصمیم گیری بهینه و با کیفیت بالا در مورد قرار دادن VNF در میان میزبانهای فیزیکی برای تحقق بخشیدن به خدمات هستیم.

در مقالات [۴۳، ۴۴، ۴۵] هدف یافتن تعداد بهینه ی VNF ها در یک زنجیره ی سرویس و قرار گیری VNF های مورد نظر بر روی سرور در هر بازه ی زمانی می‌باشد تا بتوان میزان هزینه را در سیستم به حداقل رساند. در

این مقالات هدف کمینه کردن انرژی‌های مصرفی در هر بازه‌ی زمانی می‌باشد که شامل هزینه‌ی انرژی مصرفی هر VNF مستقر بر روی سرور در حال کار و هزینه‌ی استقرار VNF های جدید در هر لحظه‌ی زمانی می‌باشد. همچنین مجموع منابع مصرفی VNF های مستقر بر روی هر سرور در هر لحظه میبایست از منابع آن سرور کمتر باشد تا مساله عملی شود. با استفاده از الگوریتم آنلاین این مساله حل شده است. در مقاله‌ی [۴۴، ۴۵] نرخ جریان هر VNF و سرور نیز در نظر گرفته شده است و دیتا سترها و VNF ها به صورت گرافی شبیه سازی شده اند. در مقاله‌ی [۴۵] الگوریتم روند کردن استفاده کرده که نتیجه‌ی خوبی را در مقابل مساله‌ی آفلاین دارد. در مقاله‌ی [۴۶] مساله‌ی قرار دادن VNF ها در لبه مورد بررسی قرار می‌گیرد که در اینجا تخصیص VNF ها در یک سیستم با زیرساخت لبه مورد توجه قرار گرفته است و هدف کمینه کردن تاخیر انتها به انتها از هر کاربر به VNF مورد نظر آن می‌باشد و از روش دینامیکی و پویا برای حل مساله استفاده شده است. در مقاله‌ی [۴۷] مساله‌ی قرار دادن VNF در شبکه‌های فعال SDN/NFV مطالعه شده است، که به طور طبیعی به عنوان یک مساله‌ی برنامه نویسی باینری (BIP) فرموله شده است. در این مساله قرارگیری VNF زنجیر عملکرد سرویس مورد بررسی قرار گرفته شده است. با استفاده از روش یادگیری تقویت عمیق، الگوریتم قرارگیری VNF مبتنی بر شبکه DDQN^۳ پیشنهاد می‌کنیم. در مقاله‌ی [۴۸] مسئله‌ی بهینه سازی مشترک قرار دادن VNF ها و زمانبندی جریان مطالعه شده است. این مساله از نوع برنامه نویسی عدد صحیح می‌باشد. برای حالت تک جریان، مساله به سادگی قابل حل است اما برای چندین جریان مساله NP-hard خواهد بود و با استفاده از روش relax کردن لاگرانژ قابل حل می‌باشد.

۳.۲ روش‌های حل

در این بخش مروری بر حل مسائل توسط مقالات می‌نماییم. ابتدا به دو مسئله‌ی معروف NP-Hard اشاره می‌کنیم سپس به حل مسائل با استفاده از روش یادگیری تقویتی می‌پردازیم.

۱.۳.۲ مسئله‌ی کوله‌پشتی و بسته‌بندی جعبه

در اینجا به دو مسئله‌ی کوله‌پشتی و بسته‌بندی جعبه می‌پردازیم. این دو مسئله NP-Hard هستند. مسئله‌ی NP-hard را نمی‌توان در زمان چند جمله‌ای حل کرد در نتیجه از روشهای ابتکاری برای رسیدن به جواب نزدیکه بهینه استفاده می‌شود.

³Double Deep Q-learning

۱.۱.۳.۲ مسئله‌ی کوله‌پشتی

یکی از مسائل پیش رو، مسئله‌ی کوله‌پشتی^۴ می‌باشد. این مسئله، از جنس NP-hard می‌باشد که در این مسئله می‌خواهیم تعدادی شی با وزنهای مختلف را در تعدادی جایگاه با ظرفیت مشخص قرار دهیم. هدف در این مسئله قرارگیری بیشترین تعداد اشیاء در این جایگاه‌ها می‌باشد. حل این مسئله با استفاده از روش‌های مختلف صورت می‌گیرد.

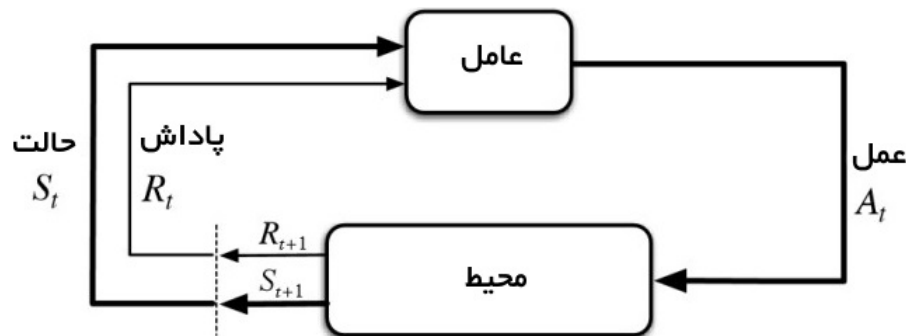
در مقاله‌ی [۱۰] همانطور که قبل تر اشاره شد، مسئله‌ی پذیرش کاربر و ارتباط کاربر از جنس کوله‌پشتی می‌باشد که به ترتیب با استفاده از الگوریتم دینامیکی و الگوریتم حریص تعریف شده در مقاله حل می‌گردد. در مقاله‌ی [۴۹] یک راه حل جامع شامل برش شبکه، پیش بینی ترافیک، کنترل پذیرش و برنامه ریزی برای یک سیستم شامل برش شبکه ۵G ارائه شده‌است. راه حل کنترل پذیرش به یک مسئله کوله‌پشتی هندسی (دو بعدی) ترسیم شده و دو الگوریتم کم پیچیدگی به ترتیب برای درخواست‌های برش شبکه منظم و نامنظم طراحی شده‌اند.

۲.۱.۳.۲ مسئله‌ی بسته‌بندی جعبه

در این مسئله هدف قرار دادن تعدادی شیء در تعدادی جعبه با ظرفیت مشخص می‌باشد. در مسئله‌ی بسته‌بندی جعبه^۵ هدف کمینه کردن تعداد جعبه‌های ورودی با فرض اینکه همه‌ی اشیاء در آن جا شوند. در مقاله‌ی [۵۰] مسئله‌ی تخصیص منابع و بدست آوردن انرژی بهینه در ساختار H-CRAN می‌باشد. در این مقاله هدف تخصیص همزمان منابع ایستگاه رادیویی RRH و باند پایه BBU می‌باشد. این مسئله به دو بخش مجزا برای تخصیص منابع هر بخش شکسته می‌شود. بخش دوم که مربوط به زمان بندی و برنامه ریزی BBU می‌باشد به فرم یک مسئله‌ی باینری بسته‌بندی جعبه نوشته می‌شود. برای حل این الگوریتم از روش‌های مختلفی از جمله First-Fit(NF)، First-Fit(FF)، First-Fit-Decreasing(FFD) و Best-Fit-Decreasing(BFD) می‌باشد که الگوریتم به کار رفته در مسئله از نوع روش BFD است که جواب بهتری در مقایسه با روشهای دیگر دارد.

در مقاله‌ی [۵۱] به صورت همزمان قرار دادن VNF ها و تخصیص منابع محاسباتی مورد هدف قرار داده شده‌است. این مسئله به صورت برنامه نویسی خطی mixed-integer می‌شود که بعد از تغییرات به صورت برنامه نویسی خطی عدد صحیح میتوان نوشت که به فرم مسئله‌ی بسته‌بندی جعبه خواهد بود که با استفاده از الگوریتم مشابه BFD حل می‌گردد.

⁴knapsack⁵bin packing



شکل ۳.۲: یادگیری تقویتی

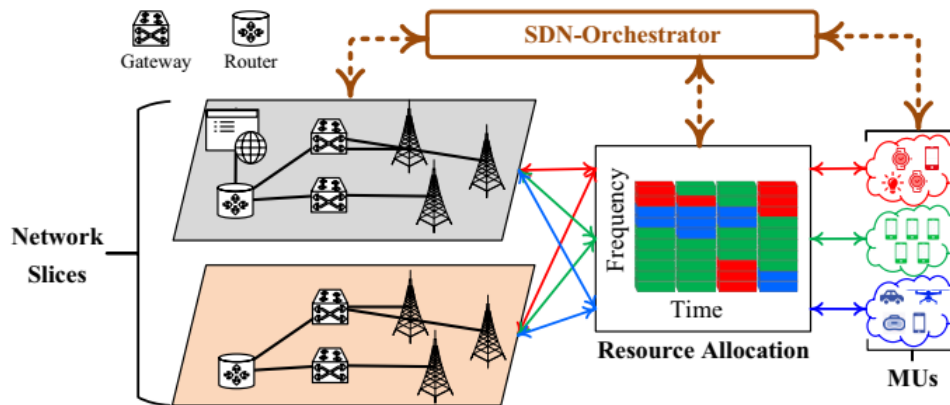
۲.۳.۲ روشهای یادگیری تقویتی

در این بخش تمرکز ما بر روی مقالاتی است که از روش یادگیری عمیق در حل مسئله استفاده می‌کند. یادگیری تقویتی^۶ در حال حاضر یکی از موضوعات داغ پژوهشی محسوب می‌شود و محبوبیت آن روز به روز در حال افزایش است. یادگیری تقویتی گونه‌ای از روش‌های یادگیری ماشین است که یک عامل (agent) را قادر به یادگیری در محیطی تعاملی با استفاده از آزمون و خطاها و استفاده از بازخوردهای اعمال و تجربیات خود می‌سازد. اگرچه هم یادگیری نظارت شده و هم یادگیری تقویتی از نداشت بین ورودی و خروجی استفاده می‌کنند، اما در یادگیری تقویتی که در آن بازخوردهای فراهم شده برای عامل، مجموعه صحیحی از اعمال، جهت انجام دادن یک وظیفه هستند، برخلاف یادگیری نظارت شده از پاداش‌ها و تنبیه‌ها به عنوان سیگنال‌هایی برای رفتار مثبت و منفی بهره‌برده می‌شود. در یادگیری تقویتی هدف پیدا کردن مدل داده مناسبی است که پاداش کل را برای عامل، بیشینه می‌کند. تصویر زیر ایده اساسی و عناصر درگیر در یک مدل یادگیری تقویتی را نشان می‌دهد. برخی از اصطلاحاتی که عناصر یک مساله یادگیری تقویتی را تشریح می‌کنند در ادامه بیان شده‌است.

- محیط (Environment): جهان فیزیکی که عامل در آن عمل می‌کند.
 - حالت (State): موقعیت کنونی عامل
 - پاداش (Reward): بازخورد از محیط
 - سیاست (Policy): روشی برای نگاشت حالت عامل به عمل
 - ارزش (Value): پاداش آینده که یک عامل با اقدام به یک عمل در یک حالت خاص به آن دست می‌یابد.
- یادگیری تقویتی عمیق DRL^۷، از شبکه‌های عصبی عمیق برای حل مسائل یادگیری تقویتی استفاده می‌کند،

^۶Reinforcement Learning

^۷Deep Reinforcement Learning



شکل ۴.۲: سناریوی ارسال لینک بالا و پایین در برشهای شبکه

از این رو در نام آن از کلمه عمیق استفاده شده است. با در نظر گرفتن Q-Learning که یادگیری تقویتی کلاسیک محسوب می‌شود و Deep-Q-Learning می‌توان تفاوت آن‌ها با یکدیگر را دید. در رویکرد اول، از الگوریتم‌های سنتی برای ساخت جدول Q استفاده می‌شود تا به عامل در یافتن اقدامی که باید در هر حالت انجام شود کمک کند. در دومین رویکرد، از شبکه عصبی (برای تخمین پاداش بر مبنای حالت: مقدار Q استفاده می‌شود.

در مقاله‌ی [۵۲، ۵۳] سناریویی در نظر گرفته شده است که شامل چندین برش در یک شبکه دسترسی رادیویی با ایستگاههای پایه است که از منابع فیزیکی مشترک (به عنوان مثال، پهنای باند) استفاده میکنند. با استفاده از یادگیری تقویت عمیق (DRL) با در نظر گرفتن تقاضای مختلف خدمات به عنوان وضعیت محیط و منابع اختصاص یافته به عنوان عمل محیط، این مشکل حل می‌شود. برای کاهش نویز و رسیدن به سطح انتظار خدمات، از روش GAN در بخش عمیق الگوریتم استفاده شده است که منجر به حداقل رساندن اختلاف بین توزیع مقدار-عمل تخمین زده شده و توزیع ارزش عمل هدف می‌شود. برای یافتن سیاست بهینه تخصیص منابع از روش DDQN^۸ استفاده می‌شود.

در مقاله‌ی [۵۴] الگوریتم تخصیص منابع برش شبکه انتها به انتها مبتنی بر DQN^۹ پیشنهاد شده است که برای سناریوهای چند برش و چند سرویس مناسب است. در این سیستم دو مدل سرویس ارائه شده است که اولی بر مبنای نیاز به رسیدن به نرخ خاص و دومی نیازمند داشتن تاخیر کم می‌باشد. هدف در این سیستم رسیدن به بیشینه نرخ دسترسی است. برای رسیدن به هدف مورد نظر برشها به دو بخش دسترسی و اصلی تقسیم شده‌اند. در اینجا الگوریتم به طور مشترک برشهای شبکه دسترسی رادیویی و برشهای شبکه اصلی را در نظر می‌گیرد تا

^۸Double Deep Q-Network

^۹deep Q-Network

منابع را به صورت دینامیکی طوری اختصاص دهد که حداکثر میزان کاربران به شبکه دسترسی داشته و به بیشینه نرخ برسد. این سیستم به صورت برنامه‌ی mixed-integer نوشته می‌شود و مسئله به صورت دو مسئله‌ی کوله‌پشتی و اتصال لینک‌ها بیان می‌شود و با استفاده از روش DQN حل می‌گردد.

۴.۲ نتیجه‌گیری

در این فصل، ابتدا در مورد مسائل پیشین صحبت می‌نماییم که شامل مسائل مرتبط با برش شبکه، شبکه‌های دسترسی رادیویی باز و قرارگیری توابع شبکه‌ی مجازی می‌باشد. سپس در مورد روش‌های حل صحبت نمودیم. این روش‌ها شامل دو مسئله‌ی NP-Hard است که مسئله‌ی کوله‌پشتی و بسته‌بندی جعبه را شامل می‌شود. همچنین روش حل دیگر، روش یادگیری تقویتی است که با استفاده از روش‌های یادگیری ماشین به حل مسائل می‌پردازد.

فصل ۳

تخصیص منابع در شبکه‌های دسترسی رادیویی باز

۱.۳ مقدمه

در این فصل، هدف تخصیص منابع در شبکه‌های Open RAN در لینک فروسو می‌باشد که شامل تخصیص توان و برش‌های شبکه است. در این بخش فرض بر این است که در شبکه‌ی نسل پنجم مخابرات از زیرساخت Open RAN استفاده شده است. این شبکه سرویس‌هایی از قبیل IoT، سرویس تلفن، پیامک و ... در اختیار کاربران قرار می‌دهد. در اینجا مفهوم برش شبکه در سیستم بدین صورت به کار رفته که به جای دیدن کاربران به صورت مجزا، کاربرانی که از یک سرویس خاص استفاده می‌نمایند در دسته‌ی آن سرویس قرار گرفته و دسته بندی می‌شوند. همچنین برش‌هایی از شبکه در اختیار کاربران هر سرویس خاص، قرار می‌گیرد که هر برش شبکه شامل تعدادی واحد رادیویی^۱ (RU)، بلوک‌های منبع فیزیکی^۲ (PRB)، یک واحد توزیع شده^۳ (DU)، یک واحد مرکزی^۴ (CU) می‌باشد که هر واحد توزیع شده و مرکزی شامل تعدادی توابع شبکه‌ی مجازی شده^۵ (VNF) می‌باشد.

در این سیستم هدف، بررسی مسئله‌ی برش شبکه در بخش RAN و بخشی از هسته در شبکه‌های دسترسی باز ORAN می‌باشد. ما مسئله زمانبندی لینک بی سیم، اختصاص برشها به سرویسها و اختصاص مراکز داده به برشها را که از مشکلات بسته بندی جعبه ۳- بعدی است را فرموله می‌کنیم. هدف این است که به طور مشترک

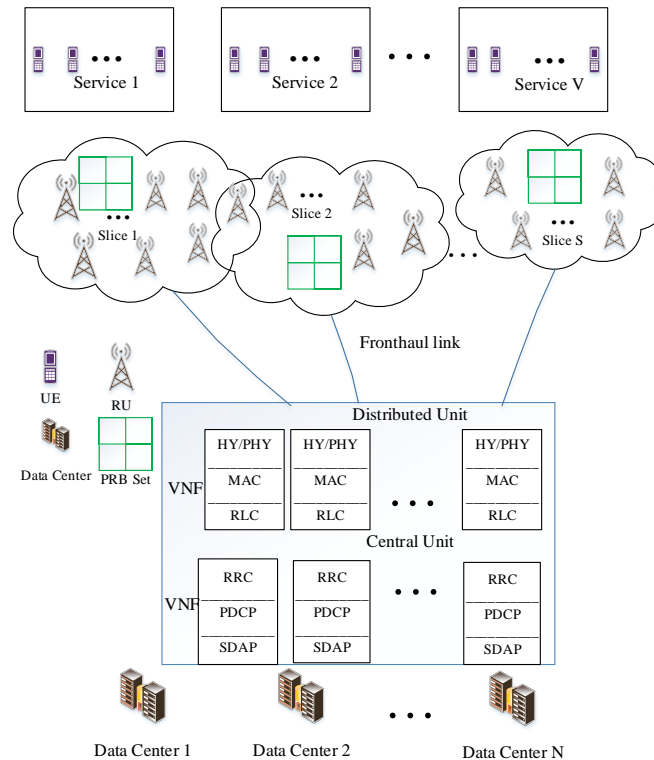
¹Radio Unit

²Physical Resource Block

³Distributed Unit

⁴Centralized Unit

⁵Virtual Network Function



شکل ۱.۳: برش شبکه در ORAN

بهره‌وری انرژی را به حداکثر برسانیم و مصرف توان واحدهای رادیویی را کاهش داده تا هزینه منابع فیزیکی را در یک کانال فروسو به حداقل برسانیم. این مسئله به صورت یک مسئله mixed-integer بیان می‌شود و به دو مسئله‌ی کوچکتر قابل جداسازی است. با استفاده از الگوریتمهای ابتکاری، این مسائل حل شده‌اند. در شکل ۱.۳ لینک فروسو در سیستم ORAN نشان داده شده است که بخش RAN به سه لایه تقسیم می‌گردد که شامل بخش، CU RU و بخش DU می‌باشد. بخش و DU CU بر روی مرکز داده اجرا می‌شوند. کاربران براساس نیاز سرویسهای مختلف تقسیم شده‌اند.

نواوری‌های این کار در ادامه بیان شده است.

- به طور همزمان برش شبکه و تخصیص منابع در سیستم ORAN در نظر گرفته شده است.
- مسئله‌ی پذیرش کاربر و تخصیص خدمات به برش‌ها، و منابع فیزیکی بی‌سیم و مرکز داده به برش‌ها را به عنوان یک مسئله‌ی بهینه‌سازی حل می‌کنیم.
- از الگوریتمهای ابتکاری در جهت حل این مسائل برای رسیدن به پاسخ نسبتاً بهینه استفاده کرده تا در کمترین زمان پاسخ نسبتاً بهینه را بدهد.

۲.۳ مدل سیستم

در این قسمت، سیستم مدل به صورت کامل مورد بررسی قرار می‌گیرد. فرض می‌کنیم S برش شبکه داریم که قرار است V سرویس مختلف که شامل کاربرانی است که از سرویس خاص استفاده می‌نمایند را سرویس دهی نماید. هر سرویس $v \in \{1, 2, \dots, V\}$ شامل U_v کاربر تک آنتنه می‌باشند که سرویس خاصی را درخواست می‌نماید. هر برش شبکه $s \in \{1, 2, \dots, S\}$ شامل R_s واحد رادیویی، K_s بلوک‌های منابع فیزیکی، یک واحد توزیع شده و یک واحد مرکزی که شامل VNF هایی می‌باشند. همچنین برش‌های شبکه می‌توانند منابع مشترک داشته باشند. تمام RU هایی که به یک سرویس خاص خدمت رسانی می‌کنند به صورت مشارکتی سیگنال به تمام کاربران در آن سرویس ارسال می‌نمایند. [۵۵، ۵۶] هر واحد رادیویی $r \in \{1, 2, \dots, R\}$ به یک واحد توزیع شده از طریق لینک فیبر نوری با ظرفیت fronthaul محدود متصل می‌باشد. در سیستم Open RAN دو لایه‌ی پردازشی که اولی در CU و دومی در DU قرار گرفته است که پردازش‌ها با VNF ها صورت می‌گیرد. لایه پایین تر (DU) شامل high-PHY، MAC و RLC می‌باشد و لایه‌ی بالاتر (CU) شامل RRC، PDPC و SDAP است. فرض بر این است که M_1 VNF در DU و M_2 VNF در CU قرار دارد. هر VNF به یک برش یا بیشتر تعلق دارد. در s^{th} امین برش شبکه $M_{s,1}$ VNF در DU و $M_{s,2}$ VNF در لایه‌ی CU می‌باشد. VNF های موجود در لایه‌ی DU و VU به ترتیب دارای ظرفیت محاسباتی μ_1 و μ_2 می‌باشند.

۱.۲.۳ نرخ قابل دسترس

نرخ قابل دسترس برای i^{th} امین کاربر در v^{th} امین سرویس به صورت زیر نوشته می‌شود

$$\mathcal{R}_{u(v,i)} = B \log_2(1 + \rho_{u(v,i)}), \quad (۱.۳)$$

که B پهنای باند سیستم و $\rho_{u(v,i)}$ نسبت سیگنال به نویز i^{th} امین کاربر در v^{th} امین سرویس می‌باشد که از رابطه‌ی زیر بدست می‌آید

$$\rho_{u(v,i)} = \frac{p_{u(v,i)} \sum_{s=1}^S |\mathbf{h}_{R_s,u(v,i)}^H \mathbf{w}_{R_s,u(v,i)}|^2 a_{v,s}}{BN_o + I_{u(v,i)}}, \quad (۲.۳)$$

که $p_{u(v,i)}$ نشان دهنده‌ی توان ارسالی توسط RU به i^{th} امین کاربر در v^{th} امین سرویس است و $\mathbf{h}_{R_s,u(v,i)} \in \mathbb{C}^{R_s}$ بردار کانال گین لینک وایرلس از RU ها در s^{th} امین برش شبکه می‌باشد. همچنین $\mathbf{w}_{R_s,u(v,i)} \in \mathbb{C}^{R_s}$

تخصیص منابع در شبکه‌های دسترسی رادیویی باز با برش‌دهی شبکه فصل ۳: تخصیص منابع در شبکه‌های دسترسی رادیویی باز

نشان دهنده ی بردار بیم فرمینگ ارسالی برای RUها در s امین برش شبکه به کاربر i ام در سرویس v ام می‌باشد. به علاوه، BN نشان دهنده ی توان نویز اضافه شونده ی گوسی می‌باشد و $I_{u(v,i)}$ توان سیگنال تداخلی است. همچنین $a_{v,s} \in \{0, 1\}$ متغیر باینری است که نشان دهنده ی این است که برش شبکه ی s به سرویس v خدمات رسانی می‌کند یا نه. در صورتی که $a_{v,s} = 1$ برش شبکه ی s به سرویس v خدمات رسانی می‌کند. در غیر این صورت خدمت رسانی نمی‌کند.

برای بدست آوردن SNR در فرمول (۲.۳)، فرض می‌شود که $\mathbf{y}_{U_v} \in \mathbb{C}^{U_v}$ بردار سیگنال دریافتی از همه ی کاربران در سرویس v می‌باشد

$$\mathbf{y}_{U_v} = \sum_{s=1}^S \sum_{k=1}^{K_s} \mathbf{H}_{\mathcal{R}_s, \mathcal{U}_v}^H \eta_{\mathcal{R}_s} \zeta_{U_v, k, s} a_{v, s} + \mathbf{z}_{U_v}, \quad (3.3)$$

که $\mathbf{x}_{\mathcal{U}_v} = [x_{u(v,1)}, \dots, x_{u(v, U_v)}]^T \in \mathbb{C}^{R_s}$ و $\eta_{\mathcal{R}_s} = \mathbf{W}_{\mathcal{R}_s, \mathcal{U}_v} \mathbf{P}_{U_v}^{\frac{1}{2}} \mathbf{x}_{\mathcal{U}_v} + \mathbf{q}_{\mathcal{R}_s}$ ارسالی کاربران سرویس v می‌باشد. $\mathbf{z}_{U_v} \sim \mathcal{N}(0, N_s \mathbf{I}_{U_v})$ و همچنین N_s توان نویز می‌باشد. علاوه بر این $\mathbf{q}_{\mathcal{R}_s} \in \mathbb{C}^{R_s}$ نشان دهنده ی نویز کوانتیزاسیون می‌باشد که از فشرده سازی سیگنال در واحد توزیع شده بدست آمده است. $\mathbf{P}_{U_v} = \text{diag}(p_{u(v,1)}, \dots, p_{u(v, U_v)})$. همچنین در اینجا، $\zeta_{k,s}^{u(v,i)} \in \{0, 1\}$ و $\zeta_{k,s}^{U_v} \triangleq \{\zeta_{k,s}^{u(v,1)}, \zeta_{k,s}^{u(v,2)}, \dots, \zeta_{k,s}^{u(v, U_v)}\}$ است که i امین کاربر در v امین سرویس امکان ارسال سیگنال خود را از طریق k PRB ام دارد یا نه، در ضمن این PRB متعلق به برش s ام می‌باشد و یا نه. $\mathbf{H}_{\mathcal{R}_s, \mathcal{U}_v} = [\mathbf{h}_{\mathcal{R}_s, u(v,1)}, \dots, \mathbf{h}_{\mathcal{R}_s, u(v, U_v)}]^T \in \mathbb{C}^{R_s \times U_v}$ نشان دهنده ی ماتریس کانال بین دسته واحد رادیویی \mathcal{R}_s به دسته \mathcal{U}_v کاربران می‌باشد. بردار کانال بین s امین برش و i امین کاربر در v امین سرویس $\mathbf{h}_{\mathcal{R}_s, u(v,i)} \in \mathbb{C}^{R_s}$ به صورت زیر نشان داده شده است

$$\mathbf{h}_{\mathcal{R}_s, u(v,i)} = \beta_{\mathcal{R}_s, u(v,i)}^{\frac{1}{2}} \mathbf{g}_{\mathcal{R}_s, u(v,i)}, \quad (4.3)$$

که در اینجا $\mathbf{g}_{\mathcal{R}_s, u(v,i)} \sim \mathcal{N}(0, N_s \mathbf{I}_{U_v})$ نشان دهنده ی بردار کانال فیدینگ سریع و تخت می‌باشد و $\beta_{\mathcal{R}_s, u(v,i)}$ $\text{diag}(b_{r(s,1), u(v,i)}, \dots, b_{r(s, R_s), u(v,i)})$ نشان دهنده ی ماتریس فیدینگ مقیاس بزرگ می‌باشد. در اینجا فرض بر این است که اطلاعات حالت کانال CSI، به صورت کامل می‌باشد.

بردار بیم فرمینگ zero forcing می‌باشد که برای $\mathbf{W}_{\mathcal{R}_s, \mathcal{U}_v} = [\mathbf{w}_{\mathcal{R}_s, u(v,1)}, \dots, \mathbf{w}_{\mathcal{R}_s, u(v, U_v)}] \in \mathbb{C}^{R_s \times U_v}$ مینیمم کردن تداخل می‌باشد و بدین صورت است

$$\mathbf{W}_{\mathcal{R}_s, \mathcal{U}_v} = \mathbf{H}_{\mathcal{R}_s, \mathcal{U}_v} (\mathbf{H}_{\mathcal{R}_s, \mathcal{U}_v}^H \mathbf{H}_{\mathcal{R}_s, \mathcal{U}_v})^{-1}. \quad (5.3)$$

فصل ۳: تخصیص منابع در شبکه‌های دسترسی رادیویی باز تخصیص منابع در شبکه‌های دسترسی رادیویی باز با برش دهی شبکه

توان تداخلی کاربر u به سرویس v ام به صورت زیر بیان می‌شود

$$\begin{aligned}
 I_{u(v,i)} = & \underbrace{\sum_{s=1}^S \sum_{n=1}^S \sum_{\substack{l=1 \\ l \neq i}}^{U_v} \gamma_1 p_{u(v,l)} a_{v,s} \zeta_{n,s}^{u(v,i)} \zeta_{n,s}^{u(v,l)}}_{\text{(intra-service interference)}} \\
 & + \underbrace{\sum_{\substack{y=1 \\ l \neq v}}^V \sum_{s=1}^S \sum_{n=1}^S \sum_{l=1}^{U_y} \gamma_2 p_{u(y,l)} a_{y,s} \zeta_{n,s}^{u(v,i)} \zeta_{n,s}^{u(y,l)}}_{\text{(inter-service interference)}} \\
 & + \underbrace{\sum_{s=1}^S \sum_{j=1}^{R_s} \sigma_{q_{r(s,j)}}^2 |\mathbf{h}_{r(s,j),u(v,i)}|^2 a_{v,s}}_{\text{(quantization noise interference)}}
 \end{aligned} \tag{۶.۳}$$

که $\gamma_1 = |\mathbf{h}_{\mathcal{R}_s, u(v,i)}^H \mathbf{w}_{\mathcal{R}_s, u(v,i)}|^2$ و $\gamma_2 = |\mathbf{h}_{\mathcal{R}_s, u(v,i)}^H \mathbf{w}_{\mathcal{R}_s, u(v,l)}|^2$ همچنین

$\sigma_{q_{r(s,j)}}$ واریانس نویز کوانتیزاسیون j امین واحد رادیویی در برش s می‌باشد. سیگنال تداخلی برای هر کاربر از سیگنالهای کاربرانی بدست می‌آید که از PRB مشترکی استفاده نموده اند. در صورت قرار دادن P_{max} به جای $p_{u(y,l)}$ و $p_{u(v,l)}$ باند بالایی $\bar{I}_{u(v,i)}$ برای $I_{u(v,i)}$ بدست می‌آید بنابراین، $\forall v, \forall i, \bar{\mathcal{R}}_{u(v,i)} \leq \bar{I}_{u(v,i)}$ از قرار گرفتن $\bar{I}_{u(v,i)}$ به جای $I_{u(v,i)}$ در رابطه ی (۱.۳) و (۲.۳) بدست می‌آید.

فرض کنید $\bar{p}_{r(s,j)}$ نشان دهنده‌ی توان سیگنال ارسالی از j امین واحد رادیویی در s امین برش می‌باشد. از رابطه ی (۳.۳) داریم

$$\bar{p}_{r(s,j)} = \sum_{v=1}^V \mathbf{w}_{r(s,j), \mathcal{U}_v} \mathbf{P}_{\mathcal{U}_v}^{\frac{1}{\gamma}} \mathbf{P}_{\mathcal{U}_v}^{H \frac{1}{\gamma}} \mathbf{w}_{r(s,j), \mathcal{U}_v}^H a_{v,s} + \sigma_{q_{r(s,j)}}^2. \tag{۷.۳}$$

در این صورت نرخ کاربران در لینک fronthaul بین j امین واحد رادیویی در برش s ام با واحد توزیع شده ی موجود در این برش، بدین صورت می‌باشد [۵۷، ۵۸]

$$C_{R(s,j)} = \log \left(1 + \sum_{v=1}^V \frac{w_{r(s,j), \mathcal{D}_s} \mathbf{P}_{\mathcal{U}_v}^{\frac{1}{\gamma}} \mathbf{P}_{\mathcal{U}_v}^{H \frac{1}{\gamma}} w_{r(s,j), \mathcal{U}_v}^H a_{v,s}}{\sigma_{q_{r(s,j)}}^2} \right), \tag{۸.۳}$$

که در اینجا $a_{v,s}$ متغیر باینری است که نشان دهنده ی این است که برش s ام به سرویس v خدمات رسانی می‌کند

۲.۲.۳ میانگین تاخیر

فرض کنید ورود بسته‌های کاربران، فرآیند پواسون با نرخ ورود $\lambda_{u(v,i)}$ برای i امین کاربر در سرویس v ام می‌باشد. بنابراین، در لایه ی واحد مرکزی (CU)، میانگین نرخ ورود داده ی کاربری که از خدمات برش s استفاده می‌نماید $\alpha_{s_1} = \sum_{v=1}^V \sum_{u=1}^{U_v} a_{v,s} \lambda_{u(v,i)}$ می‌باشد. همچنین، میانگین نرخ داده ی ورودی در لایه ی DU، تقریباً مساوی میانگین نرخ داده ی ورودی لایه ی اول $\alpha_{s_1} \approx \alpha_{s_2}$ می‌باشد. میانگین نرخ داده ی ورودی در لایه ی DU، تقریباً برابر میانگین نرخ داده ی ورودی در لایه ی CU می‌باشد $\alpha_s = \alpha_{s_1} \approx \alpha_{s_2}$. در اینجا فرض بر این است که هر لایه متعادل کننده ی ترافیک موجود است که ترافیک ورودی را به طور مساوی بین VNF ها تقسیم می‌نماید [۱۱، ۳۵، ۳۶]. فرض کنید پردازش باند پایه هر VNF، بوسیله ی پردازش صف M/M/1 نشان داده می‌شود. هر بسته بوسیله ی یکی از VNF های برش شبکه، پردازش می‌شود. بنابراین، میانگین تاخیر برش s در لایه ی اول و دوم با استفاده از مدل M/M/1 به این صورت نشان داده می‌شود

$$\begin{aligned} d_{s_1} &= \frac{1}{\mu_1 - \alpha_s / M_{s,1}}, \\ d_{s_2} &= \frac{1}{\mu_2 - \alpha_s / M_{s,2}}. \end{aligned} \quad (۹.۳)$$

در اینجا $1/\mu_1$ و $1/\mu_2$ میانگین زمان سرویس دهی در لایه ی اول و دوم به ترتیب می‌باشند. α_s نرخ ورودی است که توسط متعادل کننده ی ترافیک به طور مساوی بین VNF ها تقسیم می‌شود. نرخ ورودی هر VNF در هر لایه از برش s ، $\alpha_s / M_{s,i}$ $i \in \{1, 2\}$ می‌باشد. d_{str} تاخیر ارسال برای برش s در لینک وایرلس می‌باشد. نرخ داده ی ورودی لینک وایرلس برابر نرخ داده ی ورودی متعادل کننده ی ترافیک برای هر برش است [۱۱]. همچنین زمان سرویس برای صف ارسال در هر برش s دارای توزیع نمایی با میانگین $1/(R_{tot_s})$ است و می‌توان به صورت صف M/M/1 مدل کرد [۱۱، ۳۵، ۳۶، ۳۷]. بنابراین میانگین تاخیر لایه ی ارسال بدین صورت است

$$d_{str} = \frac{1}{R_{tot_s} - \alpha_s}; \quad (۱۰.۳)$$

فصل ۳: تخصیص منابع در شبکه‌های دسترسی رادیویی باز تخصیص منابع در شبکه‌های دسترسی رادیویی باز با برش‌دهی شبکه

داده است. میانگین تاخیر در هر برش نیز بدین صورت است

$$R_{tot_s} = \sum_{v=1}^V \sum_{u=2}^{U_v} a_{v,s} R_{u(v,i)}$$

کل نرخ قابل دسترس در هر برش می‌باشد که به سرویس خاص، تخصیص

$$D_s = d_{s_1} + d_{s_2} + d_{s_{tr}} \forall s. \quad (11.3)$$

۳.۲.۳ مرکز داده ی فیزیکی

هر VNF نیازمند منابع فیزیکی است که شامل حافظه، نگهدارنده و پردازشگر می‌باشد. فرض کنید منابع مورد نیاز برای f امین VNF در برش s ام به صورت زیر می‌باشد

$$\bar{\Omega}_s^f = \{\Omega_{M,s}^f, \Omega_{S,s}^f, \Omega_{C,s}^f\}, \quad (12.3)$$

که در اینجا $\bar{\Omega}_s^f \in \mathbb{C}^3$ و $\Omega_{M,s}^f, \Omega_{S,s}^f, \Omega_{C,s}^f$ به ترتیب نشان دهنده ی مقدار حافظه، نگهدارنده و پردازشگر می‌باشد. همچنین مقدار کل حافظه، نگهدارنده و پردازشگر برای همه VNF ها در یک برش به این صورت تعریف می‌شود

$$\bar{\Omega}_{j,s}^{tot} = \sum_{f=1}^{M_{s_1}+M_{s_2}} \bar{\Omega}_{j,s}^f \quad j \in \{M, S, C\}. \quad (13.3)$$

همچنین D_c مرکز داده برای سرویس دهی به VNF ها می‌باشد. هر مرکز داده شامل تعدادی سرور برای سرویس دهی است. مقدار حافظه، نگهدارنده و پردازشگر به ترتیب با $\tau_{M_j}, \tau_{S_j}, \tau_{C_j}$ برای امین مرکز داده به ترتیب زیر می‌باشد.

$$\tau_j = \{\tau_{M_j}, \tau_{S_j}, \tau_{C_j}\},$$

در این مدل سیستم، تخصیص منابع فیزیکی به VNF ها در نظر گرفته شده است. در اینجا فرض بر این است که $y_{s,d}$ متغیر صفر و یکی است که در صورت یک بودن نشان می‌دهد مرکز داده ی d ام به s امین برش، منابع فیزیکی اختصاص داده است.

۴.۲.۳ صورت مساله

یک معیار مهم برای سنجش بهینگی یک سیستم، بهره‌وری انرژی است که نسبت نرخ کل به توان کل می‌باشد.

$$\eta(\mathbf{P}, \mathbf{A}) := \frac{\sum_{v=1}^V \sum_{k=1}^{U_v} \mathcal{R}_{u(v,k)}}{\sum_{s=1}^S \sum_{i=1}^{R_s} \bar{p}_{r(s,i)}} = \frac{\mathfrak{R}_{tot}(\mathbf{P}, \mathbf{A})}{P_r^{tot}(\mathbf{P}, \mathbf{A})}, \quad (14.3)$$

که در اینجا، $P_r^{tot}(\mathbf{P}, \mathbf{A}) = \sum_{s=1}^S \sum_{i=1}^{R_s} \bar{p}_{r(s,i)}$ توان کل مصرفی تمام واحد‌های رادیویی در یک برش می‌باشد. همچنین $\mathfrak{R}_{tot}(\mathbf{P}, \mathbf{A}) = \sum_{v=1}^V \sum_{k=1}^{U_v} \mathcal{R}_{u(v,k)}$ نرخ تمام کاربران مصرفی تمام سرویس‌ها می‌باشد. فرض کنید توان مصرفی پردازش باند پایه در هر مرکز داده‌ی d که به VNF های یک برش s متصل می‌باشد با $\phi_{s,d}$ نشان داده شده است. بنابراین می‌توان توان کل سیستم را برای کلیه مرکز داده‌های فعال که به برش شبکه سرویس دهی می‌کنند، بدین صورت نشان داد

$$\phi_{tot} = \sum_{s=1}^S \sum_{d=1}^{D_c} y_{s,d} \phi_{s,d}.$$

همچنین، یک تابع هزینه برای سرویس دهی VNF ها توسط مرکز داده‌ها بدین عنوان تعریف شده است

$$\psi_{tot} = \phi_{tot} - \nu \sum_{s=1}^S \sum_{d=1}^{D_c} \sum_{v=1}^V y_{s,d} a_{v,s} \quad (15.3)$$

که ν متغیر طراحی برای ارزش بین اولین ترم (۴.۴) است که عبارت است از کل مصرف انرژی منابع فیزیکی و ترم دوم که مقدار برش‌های پذیرفته شده برای داشتن منابع فیزیکی نشان داده شده است. هدف ما این است که مجموع نرخ را به حداکثر رسانده و توان حاصل از کل (حداکثر توان تمام واحد‌های رادیویی و کل مصرف انرژی پردازش باند پایه را در کلیه مرکز داده‌ها) به طور همزمان و با وجود محدودیت‌هایی که به شرح زیر نوشته شده است، به حداکثر برساند.

$$\max_{\mathbf{P}, \mathbf{A}, \mathbf{Y}} \quad \eta(\mathbf{P}, \mathbf{A}) + \varphi \frac{1}{\psi_{tot}(\mathbf{Y})} \quad (16.3)$$

$$\text{to subject} \quad \bar{p}_{r(s,i)} \leq P_{max} \quad \forall s, \forall i, \quad (16.3 \text{ ب})$$

$$p_{u(v,k)} \geq 0 \quad \forall v, \forall k, \quad (16.3 \text{ ج})$$

$$\mathcal{R}_{u(v,k)} \geq \mathcal{R}_{u(v,k)}^{min} \quad \forall v, \forall k, \quad (۱۶.۳)$$

$$C_{r(s,i)} \leq C_{r(s,i)}^{max} \quad \forall s, \forall i, \quad (۱۶.۳)$$

$$D_s \leq D_s^{max} \quad \forall s, \quad (۱۶.۳)$$

$$\sum_{s=1}^S a_{v,s} \geq 1 \quad \forall s, \quad (۱۶.۳)$$

$$\sum_{d=1}^{D_c} \sum_{v=1}^V y_{s,d} a_{v,s} \geq 1 \times \sum_{v=1}^V a_{v,s} \forall s, \quad (۱۶.۳)$$

$$\sum_{s=1}^S y_{s,d} \bar{\Omega}_{3,s}^{tot} \leq \tau_{3d} \forall d, \forall d \in \mathcal{E}; \quad (۱۶.۳)$$

در اینجا، $P = [p_{u(v,k)}] \forall v, \forall k$ ماتریس توان برای کاربران است، $A = [a_{v,s}] \forall v, \forall s$ نشان دهنده ی متغیر باینری برای اتصال برشها به سرویسها و $Y = [y_{s,d}] \forall s, \forall d$ متغیر باینری برای اتصال مرکز داده ی فیزیکی به VNFها می باشد. همچنین φ متغیر وزنی برای ارزش گزاری بین ترم اول و دوم تابع هدف است. (۱۶.۳) و (۱۶.۳) به ترتیب نشان دهنده ی این است که توان واحد رادیویی از حدی بیشتر نشده و توان هر کاربر یک عدد صحیح مثبت است. علاوه براین (۱۶.۳) منجر به افزایش نرخ هرکاربر از حد مورد نیاز می باشد. (۱۶.۳) و (۱۶.۳) به ترتیب محدودیت ظرفیت لینک fronthaul و محدودیت مورد نیاز برای تاخیر سیگنال ارسالی را نشان می دهد. (۱۶.۳) تضمین می کند که هر سرویس به حداقل یک برش شبکه متصل شده است. همچنین، (۱۶.۳) تضمین می کند که هر برش که شامل VNF هایی در دو لایه است، به حداقل یک مرکز داده متصل می شود. در (۱۶.۳) $\mathcal{E} = \{M, S, C\}$ و شرطها ضمانت می کند که منابع فیزیکی کافی برای VNFها وجود دارد.

مسئله ی بهینه سازی (۱۶.۳) قابل جداسازی به دو مسئله ی بهینه سازی کوچکتر می باشد زیرا متغیرها می تواند به صورت مجزا بدست آیند. ابتدا نیاز به حل مسئله ی اول داریم و پس از حل آن P و A بدست می آید. سپس با حل مسئله ی دوم و قرار دادن مقدار بهینه ی A در مسئله خروجی Y بدست می آید. مسئله ی اول به صورت زیر می باشد.

$$\max_{P,A} \quad \eta(P, A) \quad (۱۷.۳)$$

$$\text{subject to} \quad \bar{p}_{r(s,i)} \leq P_{max} \quad \forall s, \forall i, \quad (۱۷.۳)$$

$$p_{u(v,k)} \geq 0 \quad \forall v, \forall k, \quad (۱۷.۳)$$

$$\mathcal{R}_{u(v,k)} \geq \mathcal{R}_{u(v,k)}^{min} \quad \forall v, \forall k, \quad (۱۷.۳)$$

تخصیص منابع در شبکه‌های دسترسی رادیویی باز با برش‌دهی شبکه فصل ۳: تخصیص منابع در شبکه‌های دسترسی رادیویی باز

$$C_{r(s,i)} \leq C_{r(s,i)}^{max} \quad \forall s, \forall i, \quad (۵۱۷.۳)$$

$$D_s \leq D_s^{max} \quad \forall s, \quad (۱۷.۳)$$

$$\sum_{s=1}^S a_{v,s} \geq 1 \quad \forall s. \quad (۱۷.۳)$$

مسئله‌ی دوم نیز بدین صورت بیان می‌شود.

$$\min_{\mathbf{y}} \quad \psi_{tot}(\mathbf{Y}) \quad (۱۸.۳)$$

$$\text{subject to} \quad \sum_{d=1}^{D_c} \sum_{v=1}^V y_{s,d} a_{v,s} \geq 1 \times \sum_{v=1}^V a_{v,s} \quad \forall s, \quad (۱۸.۳ \text{ ب})$$

$$\sum_{s=1}^S y_{s,d} \bar{\Omega}_{\mathbf{z},s}^{tot} \leq \tau_{\mathbf{z}d} \quad \forall d, \forall \mathbf{z} \in \mathcal{E}; \quad (۱۸.۳ \text{ ج})$$

۳.۳ روش ابتکاری استفاده شده

در این بخش از روش ابتکاری برای حل مسئله (۱۷.۳) استفاده می‌کنیم که یک مسئله‌ی غیرمحدب همراه با محاسبات طولانی است. برای حل مسئله همانطور که قبلاً بیان شد، مسئله به دو بخش مختلف و مجزا تجزیه می‌شود که به صورت تکراری حل می‌گردد. در بخش اول در ابتدای کار در اولین حلقه با قرار دادن $P = P_{max}$ و $\eta = 0$ در رابطه‌ی (۱۷.۳) مقدار A بدست می‌آید. سپس با A بدست آمده، P را در معادله‌ی (۱۷.۳) برورسانی می‌کنیم. این معادله قابل تبدیل به یک مسئله‌ی محدب است و با روشهای محدب حل می‌شود. بعد از حل این مسئله، P و η برورسانی شده و این چرخه‌ی دو بخشی تا همگرا شدن ادامه دارد.

۱.۳.۳ بخش اول مسئله‌ی اول

الگوریتم تکرار شده برای بدست آوردن A در اینجا اجرا می‌گردد. بخش اول مسئله‌ی اول از جنس بسته‌بندی جعبه به صورت سه بعدی می‌باشد که یک مسئله‌ی NP-Hard است و برای حل آن نیاز به الگوریتمهای ابتکاری داریم. در [۵۹]، الگوریتم ابتکاری براساس مرتب‌سازی جعبه‌ها براساس اندازه‌گیری بیان شده‌است. در این الگوریتم، ابتدا سرویسها بر اساس مقدار نیازمندی کاربران به صورت نزولی قرار گرفته‌اند. همچنین برشهای

فصل ۳: تخصیص منابع در شبکه‌های دسترسی رادیویی بازتخصیص منابع در شبکه‌های دسترسی رادیویی باز با برش‌دهی شبکه

شبکه نیز براساس جمع وزن‌داری از ظرفیت منابع فیزیکی و پردازشی خود به صورت نزولی قرار گرفته‌اند. سپس در صورت اعمال شرط (۱۶.۳ب)، (۱۶.۳ج)، (۱۶.۳د) و (۱۶.۳ه) برش شبکه به سرویس تخصیص داده می‌شود و در غیر این صورت به برش شبکه‌ی بعدی برای اعمال شرط‌ها انتقال داده می‌شود. جزئیات الگوریتم موردنظر در ۱.۳ و براساس الگوریتم [۵۹] و روش BFD^۶ بیان شده است.

الگوریتم ۱.۳ اتصال سرویس به برش شبکه

- 1: Sort services according to the number of UEs, priority and their requirements in the descending order.
 - 2: Sort slices according to the weighted linear combination of number of PRBs, RUs and VNFs and the capacity of their resources in the descending order.
 - 3: **for** $i \leftarrow 1$ to S **do**
 - 4: **for** $j \leftarrow 1$ to V **do**
 - 5: Set $a_{i,j} = 1$
 - 6: Obtain Parameters of Systems (power, delay, rate and capacity of fronthaul links)
 - 7: **if** conditions (3.16), (3.16), (3.16) and (3.16) are not applied **then**
 - 8: Set $a_{i,j} = 0$;
 - 9: **else**
 - 10: break from inner loop;
 - 11: **end if**
 - 12: **end for**
 - 13: **end for**
-

۲.۳.۳ بخش دوم مسئله‌ی اول

در این بخش با فرض ثابت قرار دادن A توان کاربران در هر سرویس بدست می‌آید.

^۶Best Fit Decreasing

قضیه ۱.۳.۳. بهره‌وری انرژی زمانی بدست می‌آید که

$$\max_P (\mathfrak{R}_{tot}(P) - \eta^* P_{r_{tot}}(P)) = \mathfrak{R}_{tot}(P^*) - \eta^* P_{r_{tot}}(P^*) = 0. \quad (19.3)$$

□

برهان. مراجعه به [Appendix A، ۶۰]

در بخش دوم مسئله‌ی اول از الگوریتم تکراری و تابع لاگرانژ برای حل استفاده شده است. از آنجایی که تداخل تابعی از توان کاربران است، برای سادگی فرض باند بالای $\bar{I}_{u(v,i)}$ برای آن می‌کنیم. برای اینکه بتوانیم (۱۷.۳) را به صورت فرم استاندارد بهینه‌سازی محدب درآوریم، نیازمند این هستیم که متغیرهای روابط (۱۷.۳) و (۱۷.۳) را $\gamma^{C_{r(s,i)}} = \sigma_{q_{r(s,i)}}^2 \times \gamma^{C_{r(s,i)}}$ و μ, λ فرض کنیم. تغییر دهیم. فرض کنید μ, λ و ξ ماتریسهای ضرایب لاگرانژ می‌باشد که دارای مقادیر مثبت غیرصفرند. تابع لاگرانژ بدین صورت نوشته می‌شود.

$$\mathcal{L}(P; \lambda, \chi, \mu, \xi, \kappa) = \sum_{v=1}^V \sum_{k=1}^{U_v} \bar{\mathcal{R}}_{u(v,k)} - \eta \sum_{v=1}^V \sum_{i=1}^{R_s} \bar{p}_{r(s,i)} \quad (20.3)$$

$$+ \sum_{v=1}^V \sum_{k=1}^{U_v} \lambda_{u(v,k)} (\bar{\mathcal{R}}_{u(v,k)} - \mathcal{R}_{u(v,k)}^{max}) \quad (20.3 \text{ ب})$$

$$- \sum_{s=1}^S \sum_{i=1}^{R_s} \mu_{r(s,i)} (\bar{p}_{r(s,i)} - P_{max}) \quad (20.3 \text{ ج})$$

$$- \sum_{s=1}^S \sum_{i=1}^{R_s} \xi_{r(s,i)} (\bar{p}_{r(s,i)} - \sigma_{q_{r(s,i)}}^2 \gamma^{C_{r(s,i)}}). \quad (20.3 \text{ د})$$

$$+ \sum_{v=1}^V \sum_{k=1}^{U_v} \kappa_{u(v,k)} \sum_{s=1}^S (R_{u(v,k)} - \mathfrak{D}_s) a_{v,s}. \quad (20.3 \text{ ه})$$

که در اینجا $\mathfrak{D}_s = \frac{1}{D_s^{max} - d_{s_1} - d_{s_2}} + \alpha_s$ توان بهینه از (۲۰.۳) بدین صورت خواهد بود

$$p_{u(v,i)}^* = \left[\frac{\eta_{u(v,i)} \mathfrak{w}_{u(v,i)} - \mathfrak{x}_{u(v,i)} \mathfrak{z}_{u(v,i)}}{\mathfrak{x}_{u(v,i)} \mathfrak{w}_{u(v,i)}} \right]^+ \quad (21.3)$$

که در اینجا $\eta_{u(v,i)} = (\lambda_{u(v,i)} + \kappa_{u(v,k)} + 1) \frac{B}{Ln}$ و $\mathfrak{w}_{u(v,i)} = \sum_{s=1}^S |\mathbf{h}_{R_s, u(v,i)}^H \mathbf{w}_{R_s, u(v,i)}|^2 a_{v,s}$

فصل ۳: تخصیص منابع در شبکه‌های دسترسی رادیویی بازتخصیص منابع در شبکه‌های دسترسی رادیویی باز با برش‌دهی شبکه

همچنین $\mathfrak{J}_{u(v,i)} = BN_* + \bar{I}_{u(v,i)}$ و $\mathfrak{J}_{u(v,i)} = \sum_{s=1}^S \sum_{i=1}^{R_s} (\mu_{r_{u(s,i)}} + \xi_{r_{(s,i)}} + \eta) \|w_{r_{(s,i)}, u(v,i)}\|^2$ با استفاده از روش sub-gradient توان بهینه P بدست می‌آید [۵۶].

۳.۳.۳ حل دو بخش مسئله‌ی اول به صورت تکراری

در (۱.۳.۳) و (۲.۳.۳) جزئیات حل هر بخش از مسئله‌ی اول آورده شده است. در ابتدا با ثابت نگه‌داشتن $P = P_{max}$ و $\eta = 0$ مقدار A در مسئله‌ی (۱۷.۳) و با استفاده از الگوریتم (۱.۳) بدست می‌آید. پس از آن در بخش دوم، با استفاده از روش sub-gradient مقدار P بدست می‌آید. بعد از بدست آوردن P مقدار η نیز دوباره به‌روزرسانی می‌شود. سپس الگوریتم با مقادیر جدید توان و بهره‌وری انرژی دوباره تکرار می‌گردد تا همگرا شود. در اینجا الگوریتم حل مسئله‌ی اول به صورت الگوریتم (۲.۳) است.

الگوریتم ۲.۳ برش شبکه و تخصیص منابع

- 1: Set the maximum number of iterations I_{max} , convergence condition ϵ_η and the initial value $\eta^{(1)} = 0$
 - 2: Set $P = P_{max}$
 - 3: **for** counter $\leftarrow 1$ to I_{max} **do**
 - 4: Achieve A by applying Algorithm (3.1)
 - 5: Obtain P by using sub-gradient method which is mentioned in (3.3.2).
 - 6: **if** $\mathfrak{R}_{tot}(P^{(i)}, A^{(i)}) - \eta^{(i)} P_{rtot}(P^{(i)}, A^{(i)}) < \epsilon_\eta$ **then**
 - 7: Set $P^* = P^{(i)}$, $A^* = A^{(i)}$ and $\eta^* = \eta^{(i)}$;
 - 8: break;
 - 9: **else**
 - 10: $i = i + 1$, Setting $P = P^{(i)}$;
 - 11: **end if**
 - 12: **end for**
-

۴.۳.۳ حل مسئله دوم

در این بخش می‌خواهیم مسئله (۱۸.۳) را حل نماییم که قرارگیری منابع مجازی در منابع فیزیکی می‌باشد به‌طوری که تابع هزینه ψ_{tot} کمینه شود. این مسئله از جنس مسئله سه بعدی بسته‌بندی جعبه است که NP-Hard می‌باشد. برای بدست آوردن مقدار بهینه Y الگوریتم ابتکاری برای حل مسئله سه بعدی بسته‌بندی جعبه ارائه شده است. جزئیات الگوریتم در (۳.۳) نوشته شده است. در این الگوریتم، در ابتدا برشهای شبکه و مرکز داده‌ها را بر اساس جمع وزنی آنها به صورت نزولی مرتب می‌کنیم (خط ۱ و ۲ الگوریتم ۳.۳). در اینجا، پارامتر وزندار برای $\Omega_{3,s}^{tot}$ و τ_j^3 بدین صورت تعریف می‌کنیم.

$$\begin{aligned}\hat{\Omega}_s^{tot} &= w_M \bar{\Omega}_{M,s}^{tot} + w_S \bar{\Omega}_{S,s}^{tot} + w_C \bar{\Omega}_{C,s}^{tot} \\ \hat{\tau}_j &= w_M \tau_j^M + w_S \tau_j^S + w_C \tau_j^C,\end{aligned}\quad (22.3)$$

که در اینجا، $w = \{w_M, w_S, w_C\}$ وزن حافظه، نگهداری و CPU می‌باشد که از الگوریتم مورد استفاده برای بسته‌بندی سه بعدی در مقاله [۵۹] استفاده شده است. در مرحله دوم، ما تخصیص را از بیشترین برش‌های مورد نیاز به DC با بیشترین منابع فیزیکی شروع می‌کنیم (از خط ۴ تا ۱۱ الگوریتم ۳.۳). بعد از تخصیص برش شبکه به مرکز داده، در صورتی که یکی از برشهای شبکه توسط مرکز داده پذیرش نشود، برای بخش بعدی جاگذاری می‌رود (از خط ۱۲ تا ۲۵ الگوریتم ۳.۳). در آخر، اگر مرکز داده‌ای با میزان منابع کمتر آزاد باشد و بتواند برشهای یک مرکز داده‌ی دیگر با میزان منابع بیشتر را سرویس‌دهی کند، تخصیص منابع بین این دو مرکز داده جابه‌جا می‌شود (خط ۲۶ از الگوریتم ۳.۳).

۴.۳ نتایج عددی

در این بخش نتایج عددی برای مسئله اصلی بیان می‌شود. ابتدا برای مسئله اول نمودارهای شبیه‌سازی را رسم می‌کنیم. در شکل ۲.۳، بهره‌وری انرژی برای دو سری تعداد سرویس مختلف با تعداد کاربر متفاوت در هر سرویس بدست آمده است. پارامترهای شبیه‌سازی در جدول ۱.۳ قرار داده شده است. تعداد منابع فیزیکی ۱۰ تا می‌باشد. روش بهینه برای بدست آوردن A توسط MOSEK بدست آمده و برای بدست آوردن P از CVX در متلب استفاده شده است و به صورت متناوب این دو ماتریس به‌روزرسانی می‌شوند. روش بهینه، $0.9 \text{ bits}/J/Hz$ از روش آورده شده بهتر است (برای $V = 6$ و $E[U_v] = 10$). همچنین $0.9 \text{ bits}/J/Hz$

الگوریتم ۳.۳. قرار گیری منابع مجازی در منابع فیزیکی

- 1: Sort Slices according to $\hat{\Omega}_s^{tot}, \forall s$ in descending order.
- 2: Sort DCs according to $\hat{\tau}_j, \forall j$ in descending order.
- 3: $\mathbf{Y} = \mathbf{0}$
- 4: **for** $d \leftarrow 1$ to D_c **do**
- 5: **for** $s \leftarrow 1$ to S **do**
- 6: **if** $\sum_{d=1}^{D_c} y_{s,d} == 0$ and $\bar{\Omega}_{\mathfrak{z}(s)}^{tot} \leq \tau_{\mathfrak{z}} \forall \mathfrak{z}, \forall s$ **then**
- 7: Set $y_{s,d} = 1$;
- 8: $\tau_j^{\mathfrak{z}} \leftarrow \tau_j^{\mathfrak{z}} - \bar{\Omega}_{\mathfrak{z},s}^{tot} \mathfrak{z} \in \{M, S, C\}$
- 9: **end if**
- 10: **end for**
- 11: **end for**
- 12: $ind_{rem} = \{s | (\sum_{d=1}^{D_c} y_{s,d} == 0)\}$
- 13: Sort remaining amount of DCs same as before in descending order.
- 14: Sort remaining slices same as before in descending order.
- 15: **for** $r \leftarrow 1$ to S_{rem} **do**
- 16: **for** $n \leftarrow 1$ to D_c **do**
- 17: Set $y_{s,d} = 1$;
- 18: $\bar{\Omega}_{\mathfrak{z},s}^{tot} \leftarrow \bar{\Omega}_{\mathfrak{z},s}^{tot} - \tau_j^{\mathfrak{z}}$
- 19: **if** $\bar{\Omega}_s^{tot} == 0$ **then**
- 20: Set $y_{s,d} = 1$;
- 21: $\tau_j^{\mathfrak{z}} \leftarrow \tau_j^{\mathfrak{z}} - \bar{\Omega}_{\mathfrak{z},s}^{tot} \mathfrak{z} \in \{M, S, C\}$
- 22: break inner loop
- 23: **end if**
- 24: **end for**
- 25: **end for**
- 26: Remapping DCs must be done to prevent wasting Energy

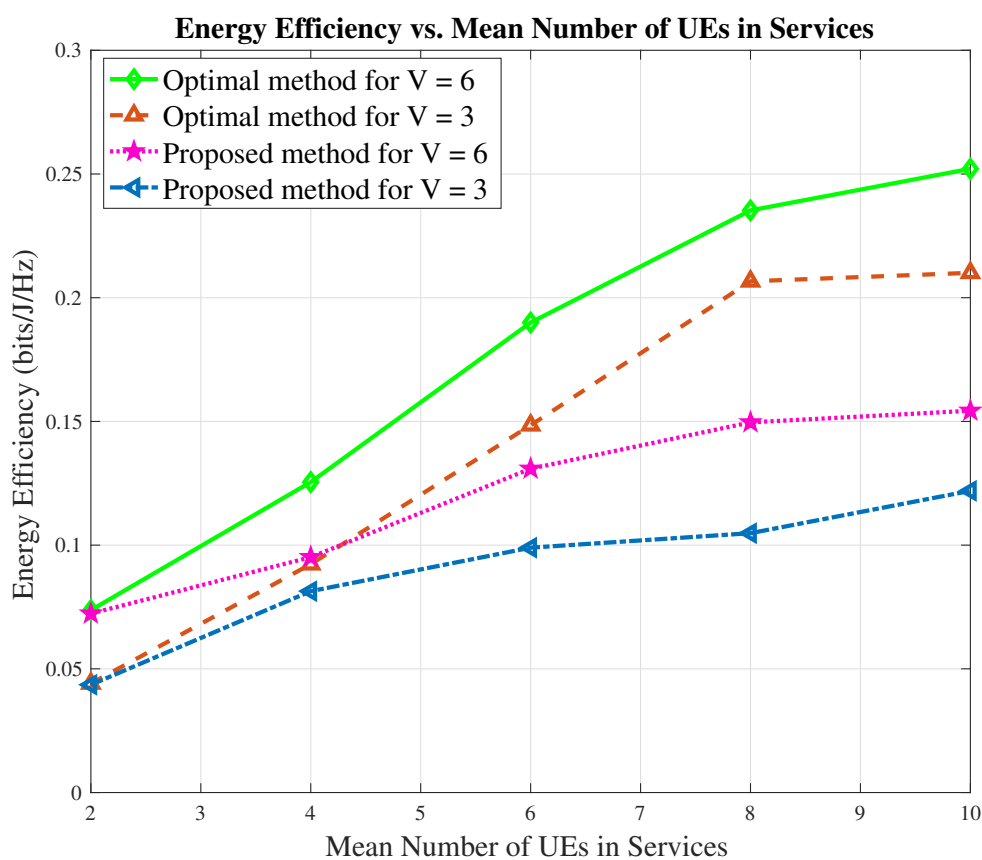
جدول ۱.۳: پارامترهای شبیه‌سازی

Parameter	Value
Noise power	-174dBm
Bandwidth	120 KHZ
Maximum transmit Power of each RU	40dBm
Minimum delay	300usec
Maximum fronthaul capacity	200 bits/sec/Hz
Minimum data rate	10 bits/sec/Hz

از روش آورده شده بهتر است (برای $V = 3$ و $E[U_v] = 10$). همانطور که در شکل مشخص است بهره‌وری انرژی با افزایش تعداد کاربران افزایش می‌یابد. در شکل ۲.۳ بهره‌وری انرژی براساس تعداد بلوکهای منابع فیزیکی برای ۶ سرویس با تعداد کاربر به طور میانگین ۳ تا رسم شده است. همانطور که در نمودارها مشخص است با افزایش تعداد، PRB، تداخل کاربران کم شده و بهره‌وری انرژی افزایش می‌یابد و الگوریتم پیشنهادی به روش بهینه نزدیک می‌گردد.

در شکل ۴.۳ بهره‌وری انرژی براساس تعداد سرویسای مختلف با فرض وجود ۲ کاربر در هر سرویس به طور میانگین، رسم شده است. همانطور که در نمودارها مشخص است با افزایش تعداد سرویسها، بهره‌وری انرژی که مجموع نرخهای کاربران بر روی آن است، افزایش می‌یابد و الگوریتم پیشنهادی به روش بهینه به نسبت نزدیک است.

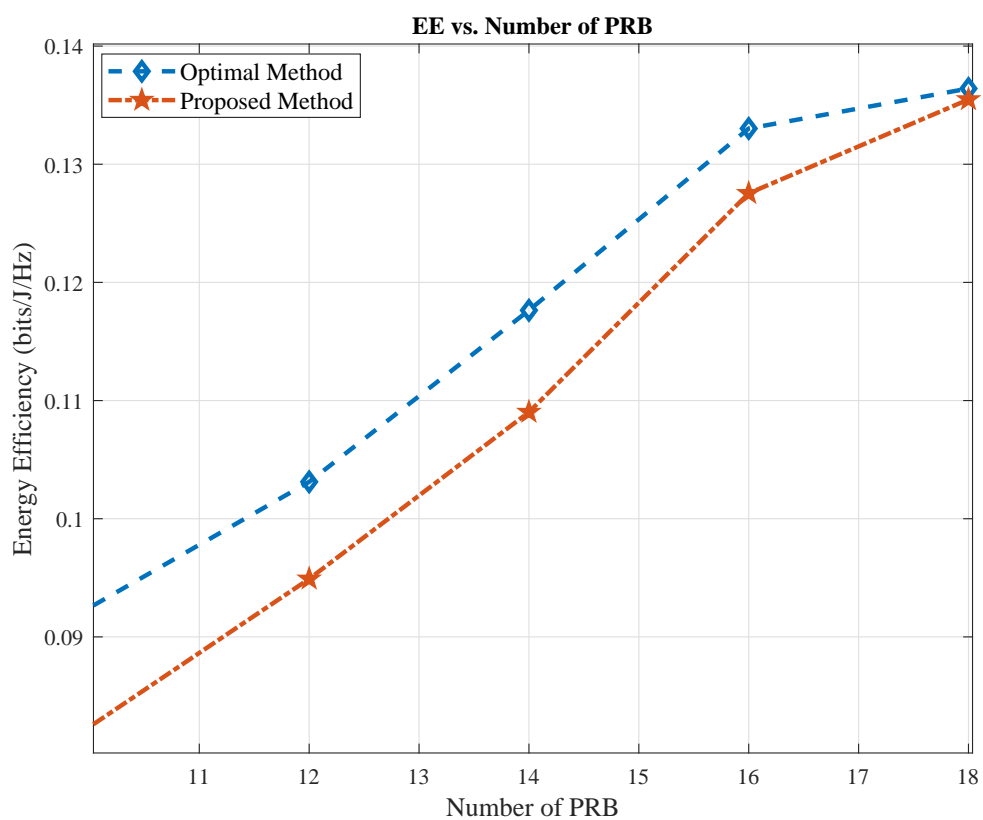
حال به نتایج عددی مسئله‌ی دوم می‌پردازیم. در شکل ۵.۳، نسبت برشهای پذیرفته شده برای دو تعداد مختلف مرکز داده با تعداد برشهای مختلف رسم شده است. پارامترهای شبیه‌سازی در جدول ۲.۳ آورده شده است. همچنین داریم $w_C = 320$ ، $w_S = 100$ و $w_M = 1$. در این شبیه‌سازی ترم دوم رابطه‌ی (۴.۴)، مورد اهمیت قرار گرفته شده است و پارامتر طراحی ν مقدار بالایی دارد. همچنین فرض شده که تنها یک مرکز داده می‌تواند هر برش را سرویس دهد. روش ارائه شده در الگوریتم ۲.۳ آورده شده و روش بهینه با استفاده از MOSEK بدست می‌آید. وقتی دو مرکز داده یا DC داریم، روش پیشنهادی و روش بهینه تقریباً همان نسبت برشهای پذیرفته شده را دارند. اما با افزایش تعداد DC ها به پنج، عملکرد روش پیشنهادی کاهش می‌یابد. با استفاده از پنج DC، تفاوت بین روش پیشنهادی و روش بهینه در بدترین حالت (۴۴ برش) حدود ۲۳ درصد است.



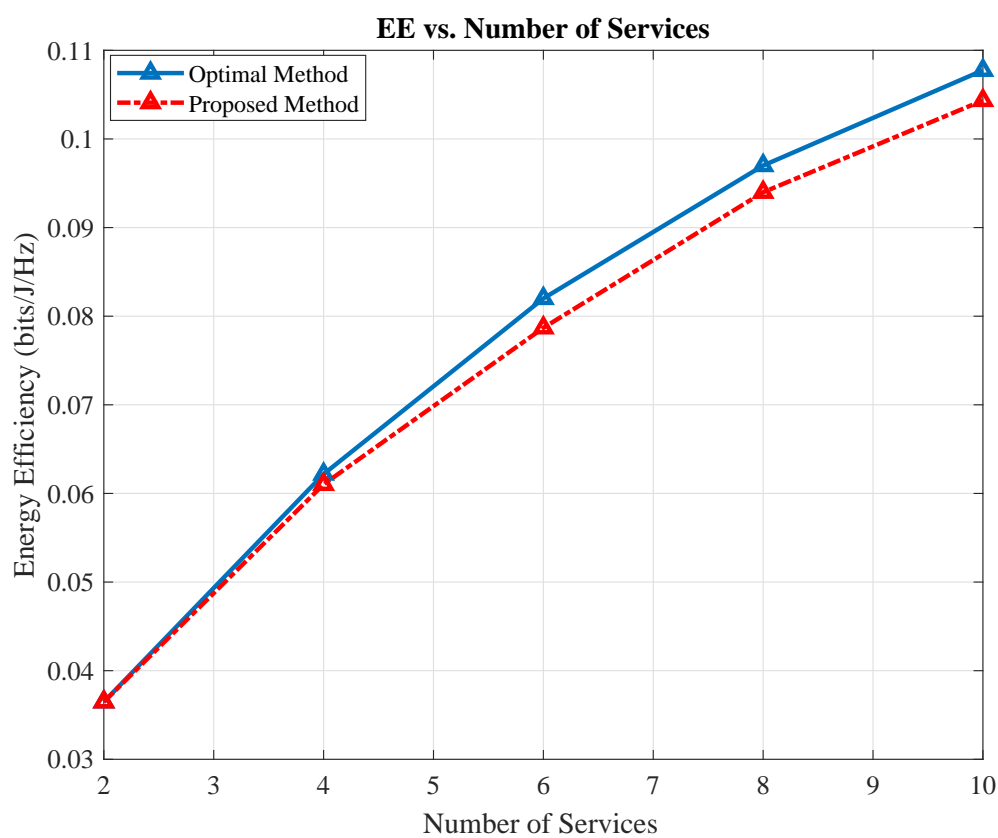
شکل ۲.۳: بهره‌وری انرژی براساس تعداد کاربران در هر سرویس

جدول ۲.۳: پارامترهای شبیه‌سازی

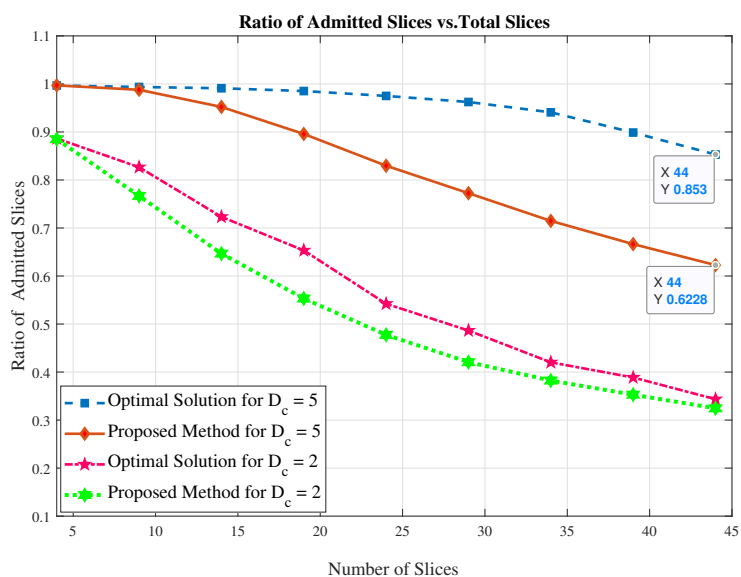
Parameter	Value
Mean of CPU for DCs	320GHz
Mean of Memory for DCs	1T
Mean of Storage for DCs	100T
Mean of CPU for Slices	32GHz
Mean of Memory for Slices	100G
Mean of Storage for Slices	10T



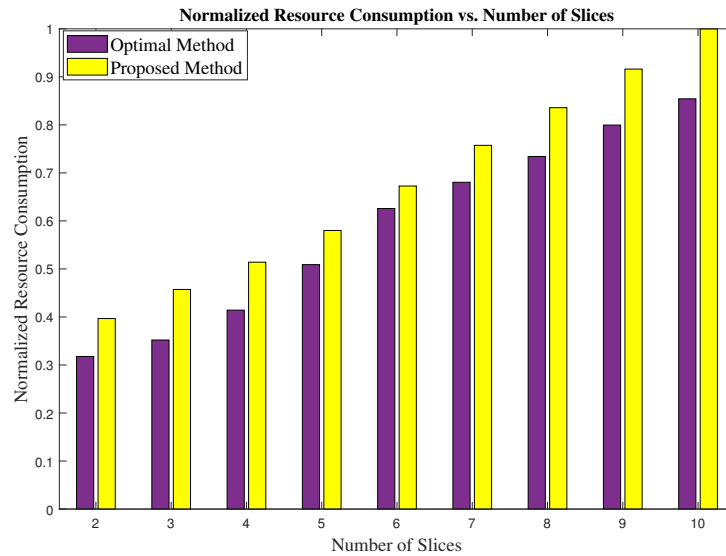
شکل ۳.۳: بهره‌وری انرژی براساس تعداد بلوکهای منابع فیزیکی



شکل ۴.۳: بهره‌وری انرژی براساس تعداد سرویس‌های مختلف



شکل ۵.۳: نسبت برش‌های پذیرفته شده فقط به یک DC در مقابل برش‌های کل



شکل ۶.۳: نرمالیزه‌ی مصرف منابع براساس تعداد برشها

در شکل ۶.۳ نرمالیزه‌ی مصرف منابع براساس تعداد برشهای شبکه آورده شده است. پارامترهای شبیه‌سازی در جدول ۲.۳، قرار داده شده و ($w_M = 1$, $w_S = 100$, $w_C = 320$). در این شبیه‌سازی، فرض کنید تعداد DC ها کاملاً کافی باشد تا تمام برش ها را پوشش دهد و پارامتر طراحی شده nu کم فرض شود، بنابراین ما روی اولین ترم (۴.۴) تمرکز کردیم. با این حال، اگر هر قطعه باقی مانده باشد، می‌تواند توسط بیش از یک DC سرویس دهی شود. بهینه بودن محل قرارگیری برشها در منابع DC بر اساس مصرف توان DC ها اندازه‌گیری می‌شود. در اینجا مقدار منابع مصرف DC نشده نشان داده شده است. برای ۱۰ برش شبکه اختلاف بین مقدار بهینه و روش اعمال شده ۱۵ درصد می‌باشد.

۵.۳ نتیجه‌گیری

در این فصل، همزمانی برش شبکه و تخصیص توان در سیستم ORAN آمده است. فرض بر این است که کاربران بر اساس نیازهایشان به سرویسهای مختلف طبقه بندی می‌شوند. همچنین، تعدادی برش نیز در خدمت این سرویسها قرار می‌گیرد. هر برش شبکه شامل تعدادی، PRB، RU، و های VNF است که اعمال CU و DU را انجام می‌دهد. ظرفیت محدود لینک fronthaul برای اتصالات فیبر بین RU و DU در نظر گرفته شده است. هدف به حداکثر رساندن مجموع نرخ و به حداقل رساندن مصرف توان و هزینه انرژی مراکز داده به طور همزمان است. این مسئله به دو زیر مسئله تجزیه می‌شود. هر زیر مسئله به طور جداگانه توسط یک الگوریتم ابتکاری

حل می‌شود. با استفاده از نتایج عددی، روش اکتشافی را تأیید کرده و عملکرد الگوریتم‌ها را مطالعه می‌کنیم. برای مسئله‌ی اول بازدهی انرژی در مقابل تعداد UE در هر سرویس به تصویر کشیده شده است. با افزایش میانگین تعداد کاربران در هر سرویس، از بازدهی انرژی بیشتر می‌شود. برای مسئله دو، دو شکل نشان داده شده است. در شکل اول، نسبت برش‌های پذیرفته شده که فقط به یک DC متصل می‌شوند، برای تعداد برش‌های مختلف مشخص شده است. در شکل دوم، مصرف منابع نرمال DC‌ها به تصویر کشیده شده است. در هر شکل، الگوریتم ابتکاری با روش بهینه مقایسه شده و تفاوت بین آنها بحث شده است.

فصل ۴

تخصیص برش شبکه به صورت دینامیکی

۱.۴ مقدمه

در این فصل هدف تخصیص برش شبکه به صورت دینامیکی می باشد. در فصل قبلی مدل سیستم به طور کامل نوشته شده است و در حالت آفلاین حل گردیده است، در این فصل پارامترها مورد نیاز را نسبت به فصل قبلی کمتر کرده و با استفاده از روش دینامیکی در هر لحظه از زمان به حل سیستم می پردازیم. برای حل این سیستم از روش یادگیری تقویتی استفاده می کنیم. در بخش اول صورت مسئله ی بخش رادیویی نوشته می شود. سپس به مدل سیستم بخش هسته می پردازیم و در نهایت روش حل هر دو مسئله و نتایج عددی آن بیان می شود.

۲.۴ مدل سیستم و صورت مسئله ی بخش رادیویی

در این بخش هدف برش شبکه در بخش رادیویی می باشد. در اینجا، مسئله ی اول فصل قبلی ساده شده و به روش دینامیکی حل می شود. همانند سیستم فصل قبل، فرض می کنیم S برش شبکه داریم که قرار است V سرویس مختلف که شامل کاربرانی است که از سرویس خاص استفاده می نمایند را سرویس دهی نماید. هر سرویس $v \in \{1, 2, \dots, V\}$ شامل تعدادی کاربر تک آنتنه می باشند که سرویس خاصی را درخواست می نماید. هر برش شبکه $s \in \{1, 2, \dots, S\}$ شامل تعدادی PRB ، RU ، BBU و VNF می باشد. در این بخش سعی بر این است که در ابتدا مسئله را به ساده ترین حالت ممکن حل نماییم. فرض می کنیم چند نوع سرویس مختلف داریم که هر نوع سرویس نیازمند مقدار نرخ خاص و تاخیر خاص هستند. در بخش اول این مسئله، هدف پیشینه سازی تعدادی

سرویسهای پذیرفته شده می‌باشد. در اینجا فرض براین است که تعداد برشهای شبکه محدود می‌باشد. فرض می‌کنیم هر سرویس v دارای اولویت p_v می‌باشد. همچنین فرض براین است که هر سرویس شامل ماکسیمم U_v کاربر است و به طور میانگین کاربران آن نیازمند داشتن نرخ بیشتر از R_v و تاخیر کمتر از D_v هستند. در صورتی که نوعی سرویس معرفی شود که تاخیر در آن حائز اهمیت نباشد، $D_v = M$ که M برای تاخیر یک عدد بزرگ می‌باشد. و در صورتی که برای یک سرویس نرخ حائز اهمیت نباشد $R_v = N$ که N یک عدد کوچک برای نرخ می‌باشد. صورت مسئله به صورت (۱.۴ج) می‌باشد. در اینجا برای سادگی فرض براین است که هر سرویس به ماکسیمم یک برش شبکه متصل می‌گردد. در اینجا هدف حل مسئله در هر اسلات زمانی t می‌باشد. هدف در اینجا بیشینه سازی تعداد سرویسهای پذیرفته شده توسط برشهای شبکه می‌باشد به صورتی که شرط تاخیر و نرخ سرویس را ضمانت کنند.

$$\max_{a(t)} \sum_{s=1}^{S(t)} \sum_{v=1}^{V(t)} p_v a_{v,s}(t) \quad (1.4\text{آ})$$

$$\text{subject to} \quad \sum_{s=1}^{S(t)} D_s(t) a_{v,s} \leq D_v(t) \forall v, \quad (1.4\text{ب})$$

$$\sum_{s=1}^{S(t)} R_s(t) a_{v,s}(t) \geq R_v(t) \forall v \quad (1.4\text{ج})$$

برای اینکه معادله (۱.۴ج) را به فرم مسئله‌ی کوله‌پشتی دربیآوریم، از آنجایی که فرض کردیم هر سرویس به ماکسیمم یک برش شبکه متصل می‌شود، می‌توان معادله بدین صورت نوشت:

$$\max_{a(t)} \sum_{s=1}^{S(t)} \sum_{v=1}^{V(t)} p_v a_{v,s}(t) \quad (2.4\text{آ})$$

$$\text{subject to} \quad \sum_{s=1}^{S(t)} D_s(t) a_{v,s} \leq D_v(t) \forall v, \quad (2.4\text{ب})$$

$$\sum_{s=1}^{S(t)} \frac{1}{R_s(t)} a_{v,s}(t) \leq \frac{1}{R_v(t)} \forall v \quad (2.4\text{ج})$$

که در اینجا، معادله (۲.۴ج) یک مسئله‌ی کوله‌پشتی دو بعدی می‌باشد. برای حل این مسئله، از روش یادگیری تقویتی استفاده می‌شود. همچنین در صورت در نظر گرفتن تاخیر در شبکه، هر برش شبکه تنها به یک سرویس اختصاص داده می‌شود.

۳.۴ مدل سیستم و صورت مسئله‌ی بخش هسته

در این بخش سعی شده، مسئله‌ی دوم فصل قبل به صورت ساده شده با روش دینامیکی حل شود. عنوان این مسئله، جاگذاری VNF ها بر روی مراکز داده می‌باشد. فرض بر این است که S برش شبکه داریم که $s \in \{1, 2, \dots, S\}$ می‌باشد. هر برش شبکه شامل تعدادی VNF است که هر VNF نیازمند منابع فیزیکی است که شامل حافظه، نگهدارنده و پردازشگر می‌باشد. فرض کنید برای سادگی مسئله برای هر VNF به مقدار کافی حافظه و نگهدارنده در مراکز داده داریم و تنها منبع مورد نیاز برای f امین VNF در برش s مقدار پردازنده است که به صورت $\bar{\Omega}_s^f$ می‌باشد که در اینجا $\bar{\Omega}_s^f \in \mathbb{C}^1$ و M_s تعداد کل VNF ها در s امین برش شبکه است.

$$\bar{\Omega}_s^{tot} = \sum_{f=1}^{M_s} \bar{\Omega}_s^f \quad (۳.۴)$$

که در اینجا $\bar{\Omega}_s^{tot}$ مقدار کل پردازشگرهای برش s می‌باشد. همچنین D_c مرکز داده برای سرویس دهی به VNF ها می‌باشد. هر مرکز داده شامل تعدادی سرور برای سرویس دهی است. همچنین فرض بر این است که هر مرکز داده، دارای پردازشگر τ می‌باشد. در این صورت مقدار پردازشگر τ_j برای j امین مرکز داده می‌باشد. در این مدل سیستم، تخصیص منابع فیزیکی به VNF ها در نظر گرفته شده است. در اینجا فرض بر این است که $y_{s,d}$ متغیر صفر و یکی است که نشان می‌دهد مرکز داده d ام به s امین برش سرویس دهی می‌کند یا نه. همانند فصل قبل، فرض کنید توان مصرفی پردازش باند پایه در هر مرکز داده d که به VNF های یک برش s سرویس می‌دهد در هر زمان t با $\phi_{s,d}(t)$ نشان داده شده است. بنابراین می‌توان توان کل سیستم را برای کلیه مراکز داده های فعال که به برش شبکه سرویس دهی می‌کنند، بدین صورت نشان داد

$$\phi_{tot}(t) = \sum_{s=1}^S \sum_{d=1}^{D_c} y_{s,d} \phi_{s,d}(t).$$

همچنین فرض کنید در هر زمان قرار دادن هر مجموعه‌ی جدید VNF های برش شبکه s بر روی مرکز داده d مقدار انرژی اضافی را بدین صورت به سیستم اعمال کنند.

$$\phi_{diff}(t) = \sum_{s=1}^S \sum_{d=1}^{D_c} [y_{s,d}(t) - y_{s,d}(t-1)]^+ \phi_{s,d}^{new}(t).$$

تابع هزینه‌ی قرارگیری VNF‌ها بر روی DC‌ها بدین صورت است

$$\psi_{tot}(t) = \phi_{tot}(t) + \phi_{diff}(t) \quad (۴.۴)$$

در اینجا هدف کمینه کردن مقدار انرژی کل در هر زمان، با فرض اینکه مجموع VNF‌های برشهای تخصیص یافته به هر مرکز داده مقدار کافی پردازنده داشته باشند. در اینجا فرض بر این است که برشهای شبکه که قبلاً به سرویسها اختصاص داده شده، می‌بایست در مرکز داده قرار داده شوند و تعداد مراکز داده به اندازه‌ی کافی زیاد هستند، هدف کمینه کردن انرژی است به صورتی که کمترین تعداد مراکز داده‌ها استفاده شوند.

$$\min_{\mathbf{Y}} \quad \psi_{tot}(\mathbf{Y})(t) \quad (۴.۵)$$

$$\text{t. s.} \quad \sum_{d=1}^{D_c} y_{s,d}(t) \geq 1 \quad \forall s, \quad (۴.۵\text{ب})$$

$$\sum_{s=1}^S y_{s,d}(t) \bar{\Omega}_s^{tot} \leq \tau_d \quad \forall d, \forall t; \quad (۴.۵\text{ج})$$

این مسئله به فرم مسئله‌ی بسته‌بندی جعبه قابل بیان است. در اینجا، τ_d مقدار پردازنده‌ی d امین مرکز داده می‌باشد.

۴.۴ حل مسئله به‌روش یادگیری تقویتی

در اینجا از روش یادگیری تقویتی در حل دو مسئله‌ی بالا استفاده می‌نماییم. در روش یادگیری تقویتی، یک عامل سعی می‌کند رفتار بهینه را در یک محیط مشخص پیدا کند. این پروسه‌ی تعاملی، به صورت پروسه‌ی تصمیم‌گیری مارکوف مدل می‌شود که شامل (S, A, R, P, γ) می‌باشد. S نشان‌دهنده‌ی ماتریس فضای حالت و A بردار رفتار می‌باشد. R نیز پاداش عمل است. $P(\cdot|s, a)$ احتمال انتقال و $\gamma \in (0, 1]$ فاکتور تخفیف می‌باشد. سیاست $\Pi(\cdot|s)$ نگاشتی از حالت به توزیع اعمال می‌باشد. تابع مقدار-حالت برای حالت s تحت سیاست $\Pi(\cdot|s)$ را $V^\Pi(s)$ نشان می‌دهند که مقدار بازده مورد انتظار در حالت s تحت سیاست $\Pi(\cdot|s)$ می‌باشد. مقدار ارزش انجام عمل a در حالت s تحت سیاست $\Pi(\cdot|s)$ را با $Q^\Pi(s, a)$ نمایش می‌دهیم. که روابط زیر را بر این اساس داریم.

$$V^\Pi(s) = \mathbb{E}_{\Pi, P} \left[\sum_{t=0}^{\infty} \gamma^t R_t | S_0 = s \right] \quad (۴.۶)$$

و تابع ارزش عمل بدین صورت است

$$Q^{\Pi}(s, a) = \mathbb{E}_{\Pi, P} \left[\sum_{t=0}^{\infty} \gamma^t R_t \mid S_0 = s, A_0 = a \right] \quad (۷.۴)$$

که در اینجا \mathbb{E} نمادی برای نشان دادن میانگین است. با توجه به رابطه‌ی بلمن، داریم:

$$V^{\Pi}(s) = \mathbb{E}_{\Pi, P} [R + \gamma V^{\Pi}(s')] \quad (۸.۴)$$

و داریم:

$$Q^{\Pi}(s, a) = \mathbb{E}_{\Pi, P} [R + \gamma Q^{\Pi}(s', a')] \quad (۹.۴)$$

که در اینجا s' و a' قابل اتخاذ از $P(\cdot | s, a)$ و سیاست $\Pi(\cdot | s')$ هستند. هدف یادگیری تقویتی، بدست آوردن سیاست بهینه می‌باشد به صورتی که $Q^{\Pi}(s, a)$ بیشینه شود. مقدار بهینه‌ی تابع ارزش عمل در رابطه‌ی بلمن بدین صورت است

$$Q^*(s, a) = \mathbb{E}_{\Pi^*, P} [R + \gamma Q^*(s', a')] \quad (۱۰.۴)$$

همچنین در صورت تعریف اپراتور T^* بلمن داریم

$$T^*Q(s, a) = \mathbb{E}_{\Pi^*, P} [R + \gamma Q(s', a')] \quad (۱۱.۴)$$

که به صورت تکراری اعمال این اپراتور $T^*Q(s, a) \leftarrow Q_{t+1}(s, a)$ منجر به همگرا شدن $Q_t(s, a) \rightarrow Q^*(s, a)$ و $t \rightarrow \infty$ می‌شود [۵۲، ۶۱]. در ابعاد بالاتر، بهتر است از تابع تقریبی استفاده شود. فرض کنید $Q_{\theta}(s, a)$ تابع تقریب با پارامتر θ می‌باشد که تقریبی از جدول مقدار عمل با (s, a) می‌باشد. هدف این بهینه‌سازی، بدست آوردن θ است به طوری که $Q_{\theta}(s, a) \cong Q^*(s, a)$ و مقدار بهینه، به طور تکراری با اعمال اپراتور T^* بدست می‌آید. مقدار بهینه‌ی θ قابل دستیابی با استفاده از مینیمم کردن خطای تفاوت زمانی (TD)

error بر روی (s, a, r, s') می‌باشد که به طور رندم انتخاب می‌شوند.

$$\zeta^2 = [r + \gamma \max_{a' \in A} Q_\theta(s', a') - Q_\theta(s, a)]^2 \quad (12.4)$$

روشهای مختلفی برای دستیابی به مینیمم خطا هست که ما در ادامه‌ی کار از روش Q-learning استفاده می‌کنیم. در روش Q-learning در هر بروزرسانی تابع Q داریم:

$$Q(s_{t+1}, a_{t+1}) = Q(s_t, a_t) + \alpha[r_{t+1} + \gamma \max_{a \in A} Q(s_{t+1}, a) - Q(s_t, a_t)] \quad (13.4)$$

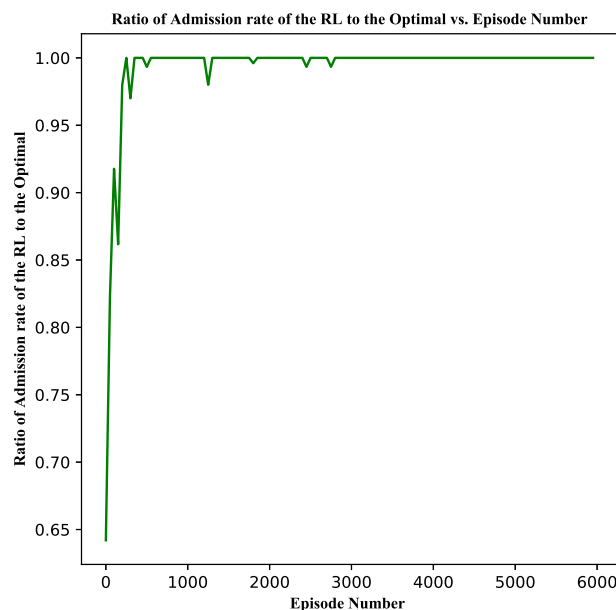
که در اینجا، α نرخ یادگیری می‌باشد.

۱.۴.۴ نتایج عددی مسئله‌ی اول

در این بخش، برای مسئله‌ی اول حالت، عامل و پاداش را تعیین می‌نماییم و سپس نتایج عملی را نشان می‌دهیم. در این مسئله، عامل، هماهنگ ساز^۱ است که وظیفه‌ی مدیریت شبکه را برعهده دارد. همچنین، حالت در هر بازه‌ی زمانی برشهایی از شبکه است که به سرویسها متصل شده و همچنین مقدار منبع باقی ماده در هر برش می‌باشد. پاداش طوری تعیین شده که بیشترین تعداد سرویسها پذیرفته شود به طوریکه شرط تاخیر و نرخ برآورده گردد. برای حل این مسئله به روش دینامیکی، دو مدل سرویس در نظر گرفتیم و شرط تاخیر در این دو مدل سرویس اعمال نشده است. در این بخش، به دلیل کم بودن تعداد حالتها، از روش Q-Learning استفاده کرده و برای جدول Q نیاز به استفاده از روش یادگیری عمیق نیست. در مدل اول سرویس نیازمند نرخ 10 bits/s و مدل دوم سرویس نیازمند نرخ 20 bits/s می‌باشد. فرض می‌کنیم نرخ ورود سرویس در هر ابتدای بازه‌ی زمانی عدد رندم با توزیع پواسون می‌باشد. نرخ خروج سرویس نیز از توزیع نرمال پیروی می‌کند. در اینجا فرض می‌کنیم از سرویس اول ماکسیمم در هر لحظه ۶ سرویس و از سرویس دوم ۳ تا سرویس درخواست می‌دهد. ۲ برش شبکه با نرخ 40 bits/s نیز وجود دارد.

در شکل ۱.۴ نسبت تعداد سرویسهای پذیرفته شده به نسبت تعداد سرویسهای پذیرفته شده در حالت بهینه براساس زمان طی شده داده می‌شود. بعد از حدود ۸۰۰ تکرار مسئله، تقریباً خروجی با خروجی بهینه یکی می‌شود و مقدار پذیرفته شده با مقدار بهینه تقریباً یکی می‌شود. بعد از حدود ۴۰۰۰ تکرار، تقریباً احتمال انتخاب عمل رندم صفر می‌شود و صرفاً با استفاده از تابع Q، عمل انتخاب می‌شود. نرخ خروج در هر بازه‌ی زمانی ۸۰ درصد

¹orchestrator



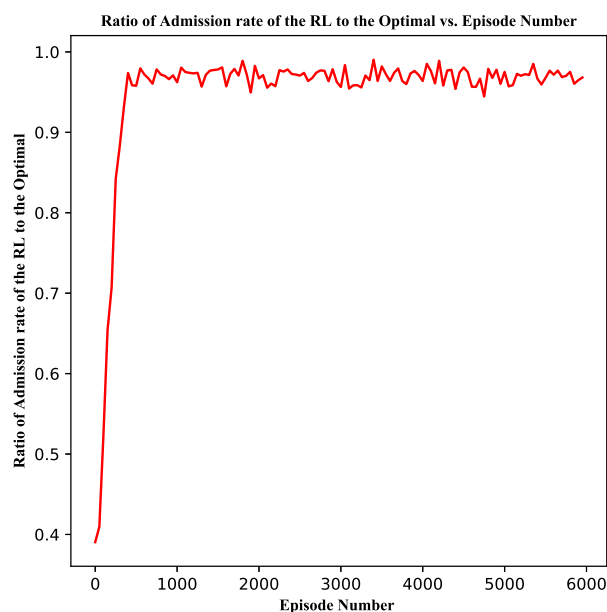
شکل ۱.۴: نسبت تعداد سرویسهای پذیرفته شده با استفاده از روش یادگیری تقویتی عمیق به نسبت تعداد سرویسهای پذیرفته شده در حالت بهینه براساس زمان طی شده

فرض شده است. در اینجا از روش $\epsilon - greedy$ برای حل استفاده شده است.

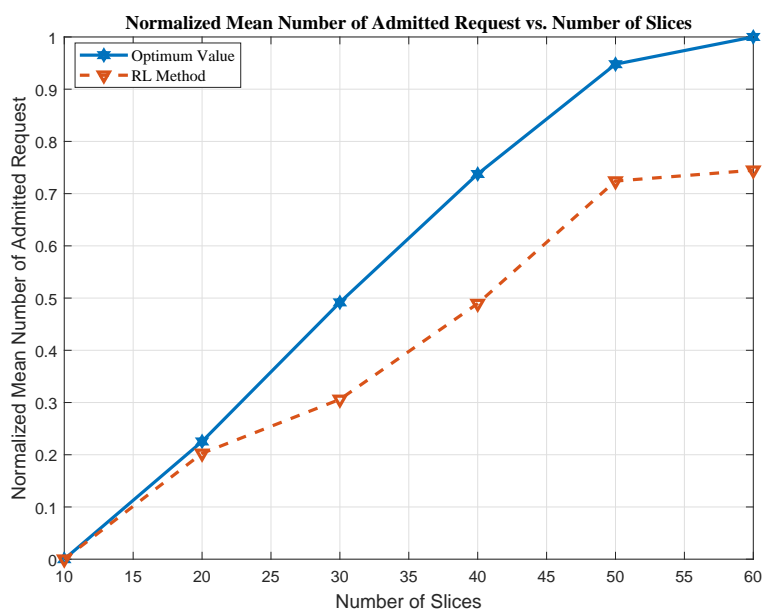
در شکل ۲.۴ با افزایش تعداد برشها و بیشینه تعداد درخواستها در هر زمان، بعد از ۱۰۰۰ تکرار سناریو جواب به حالت بهینه نزدیک شده ولی هیچ موقع با مقدار بهینه برابری نمی‌کند. در اینجا، تعداد درخواستهای سرویس اول ۱۰ تا و سرویس دوم ۵ تا می‌باشد. همچنین میزان خروج در هر بازه زمانی ۸۰ درصد سرویسهایی است که در حال پردازش هستند. در شکل ۳.۴ با افزایش تعداد برشهای شبکه و به همان نسبت تعداد درخواستها، مقدار نرمالیزه میانگین مجموع تعداد سرویسهای پذیرفته شده هر دو نوع سرویس براساس تعداد برشهای شبکه در دو حالت استفاده از روش بهینه و روش یادگیری تقویتی رسم شده است. با افزایش تعداد درخواستها و تعداد برشها، روش بهینه از روش یادگیری تقویتی فاصله می‌گیرد.

۲.۴.۴ نتایج عددی مسئله دوم

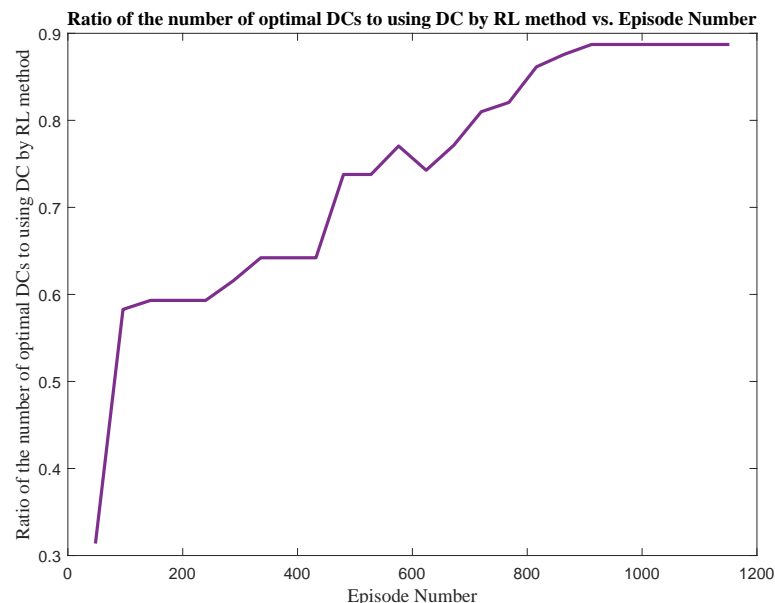
در این بخش، برای مسئله دوم حالت، عامل و پاداش را تعیین می‌نماییم و سپس نتایج عملی را نشان می‌دهیم. در این مسئله، عامل، هماهنگ ساز است که وظیفه‌ی مدیریت شبکه را برعهده دارد. همچنین، حالت در هر بازه زمانی برشهایی از شبکه است که به مراکز داده متصل شده و اینکه کدام برش به کدام مرکز داده متصل است. پاداش



شکل ۳.۴: نسبت تعداد سرویسهای پذیرفته شده روش استفاده شده به نسبت تعداد سرویسهای پذیرفته شده در حالت بهینه براساس زمان طی شده با افزایش تعداد ماکسیمم درخواستها و تعداد برشهای شبکه

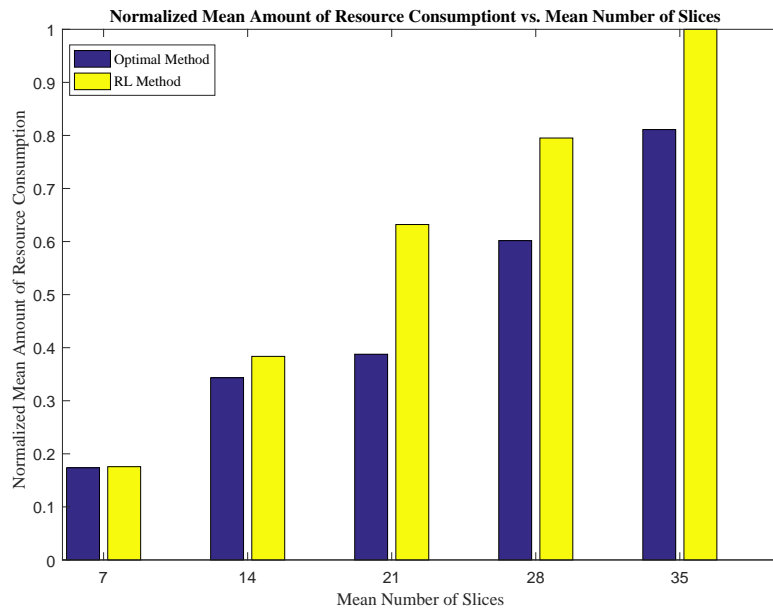


شکل ۳.۴: میانگین تعداد سرویسهای پذیرفته شده در زمان در دو حالت بهینه و استفاده از الگوریتم تقویتی با افزایش تعداد برشهای شبکه



شکل ۴.۴: نسبت تعداد سرورهای مصرفی با روش بهینه به سرورهای مصرفی با استفاده از روش یادگیری تقویتی براساس زمان طی شده

طوری تعیین شده که کمترین تعداد مراکز داده استفاده گردد و هر لحظه کمترین تعداد مرکز داده‌ی خاموش، روشن شود. در اینجا با فرض داشتن دو مدل سرویس مسئله را شبیه سازی می کنیم. فرض کنید VNF های سرویس اول نیاز به 1 CPU و سرویس دوم نیازمند 2 CPU است. فرض کنید از سرویس اول ماکسیمم ۶ تا درخواست VNF و برای سرویس دوم ماکسیمم در هر لحظه‌ی زمانی ۴ تا درخواست VNF صورت می گیرد. در این مسئله، تعداد زیادی سرور که دارای ۳ تا CPU هستند در نظر گرفته شده است. نسبت تعداد سرورهای مصرفی بهینه به سرورهای مصرفی با روش Q-learning در شکل ۴.۴ نشان داده شده است. همانطور که دیده می شود بعد از ۹۰۰ تا تکرار، تقریباً به مقدار بهینه نزدیک شده ایم. بعد از ۹۰۰ تا تکرار سناریو، تقریباً میزان انتخاب عمل رندم به صفر رسیده و عمل بهینه از روی جدول Q بدست می آید. میزان خروج در هر بازه‌ی زمانی ۸۰ درصد مقدار سرویسهایی است که در زمان قبل در سیستم حضور داشتند، فرض شده است. در شکل ۵.۴ نسبت مقدار هزینه‌ی مصرفی نرمالیزه شده به تعداد میانگین برشهای مورد نیاز در جالت بهینه و الگوریتم یادگیری تقویتی رسم شده است. در اینجا با افزایش تعداد درخواستهای برشهای شبکه به منبع پردازی به صورت میانگین، میزان هزینه‌ی مصرفی را در حالت بهینه و روش یادگیری تقویتی رسم کردیم و با افزایش درخواستها، روش یادگیری تقویتی از روش بهینه فاصله می گیرد.



شکل ۵.۴: نسبت مقدار هزینه‌ی مصرفی نرمالیزه شده به تعداد میانگین برشهای مورد نیاز در جالت بهینه و الگوریتم یادگیری تقویتی

۵.۴ نتیجه‌گیری

در این فصل، دو مسئله‌ی فصل قبلی به صورت ساده شده نوشته شد و مسئله‌ی اول در بخش رادیویی از جنس کوله‌پشتی و مسئله‌ی دوم در بخش هسته از نوع بسته‌بندی جعبه می‌باشد. این دو مسئله به صورت دینامیکی در هر لحظه از زمان حل شده‌اند. برای حل این دو مسئله از روش یادگیری تقویتی استفاده شده و حالتها و اعمال بیان برای یک عامل در این مسئله بیان کرده است. نتایج عملی آن نیز رسم گردید. در هر دو مسئله، به دلیل گسسته بودن اعمال و حالات مسئله و کم بودن تعداد آن از روش Q-learning استفاده نمودیم. در مسئله‌ی اول ابتدا با فرض تعداد کمتر مسئله بعد از تعدادی تکرار به مقدار بهینه می‌رسد. با افزایش درخواستها از مقدار بهینه تا حدی دور می‌گردد. در مسئله‌ی دوم نیز بعد از ۹۰۰ تکرار و با استفاده از جدول Q به مقدار نسبتاً بهینه میل می‌کند.

فصل ۵

پیشنهادهای و کارهای آتی

۱.۵ مقدمه

در فصل اول، مقدمه‌ای بر مفاهیم مورد استفاده را بیان کردیم و در مورد نسل پنجم مخابرات و مفاهیم آن صحبت نمودیم. سپس در فصل دوم مروری بر کارهای انجام شده کردیم و مقالات مرتبط با برش شبکه و شبکه‌های دسترسی باز و قرارگیری توابع مجازی شبکه را بیان نمودیم تا مروری بر چالشهای مطرح شده نسل پنجم مخابرات کرده و حل این چالشها را مورد بررسی قرار دادیم. در فصل سوم صورت مسئله‌ای در زمینه‌ی برش شبکه در شبکه‌های دسترسی باز، معرفی کرده و با روش ابتکاری، آن را حل نمودیم و نتایج را با مقدار بهینه مقایسه کردیم. در فصل چهارم، دو مسئله‌ی بیان شده در فصل سوم را به صورت کاملاً ساده با روش یادگیری عمیق تقویتی به صورت دینامیکی و در هر بازه‌ی زمان حل نمودیم. این دو مسئله، MDP^۱ بوده و قابل حل با این روش هستند. حال در این فصل در مورد مزایا و معایب کارهای انجام شده در فصل سوم و چهارم صحبت کرده و کارهای آتی و پیشنهادات را بیان می‌کنیم.

۲.۵ نتیجه‌گیری

در اینجا، مسئله‌ی برش شبکه در بخش رادیویی و قرارگیری توابع مجازی شبکه بر روی مراکز داده باهم مورد بررسی قرار گرفته شد. برای حل این مسئله، ابتدا مسئله به دو بخش مختلف شکسته شد که در بخش اول، تخصیص برش

¹Markov Decision Process

شبکه به کاربران سرویسها و تخصیص توان حل شده و پس از آن، برشهایی از شبکه که به سرویس اختصاص داده شده را به مراکز داده نگاشت می‌دهیم. در این مسئله، تاخیر و نرخ هر کاربر در سرویس مورد بررسی قرار گرفته شده و چالش تخصیص منابع که شامل برش بخش رادیویی به هر سرویس است و جاگیری توابع شبکه حل می‌شود. الگوریتم ارائه شده سرعت بسیار بیشتری از الگوریتم بهینه که با MOSEK و CVX بدست می‌آید، دارد. سپس مسئله به صورت ساده‌تر برای حالت دینامیکی با روش یادگیری تقویتی حل گردیده است.

۱.۲.۵ مزایای این چالش و حل آن

در مسئله‌ی بیان شده‌ی فصل سوم، مدل سیستم به صورت دقیق بیان شده و نرخ کاربر، ظرفیت لینک fronthaul و تاخیر به طور دقیق مورد بررسی قرار گرفته شده است. همچنین مسئله به واقعیت نزدیکی زیادی دارد. همچنین الگوریتم ابتکاری تعریف شده در فصل سوم برای حالتی که تداخل به نسبت کم باشد به حالت بهینه بسیار نزدیک است. در فصل چهارم همین مسئله با فرض اینکه سرویسها نیازمند تاخیر کم یا نرخ بالا هستند به صورت پارامتریک در هر لحظه از زمان حل می‌گردند. در بخش بعدی چالشهای قرارگیری توابع مجازی بر روی مراکز داده به طور دقیق بررسی شده و در فصل چهارم این مسئله به صورت دینامیکی در هر لحظه حل گردیده است. در حل مسئله در حالت دینامیکی سعی بر این است که مراکز داده کمترین انرژی را مصرف نموده و از هدر رفت انرژی بپرهیزیم.

۲.۲.۵ معایب پروژه انجام شده

در فصل سوم از الگوریتم ابتکاری در این کار استفاده شده است. زمانی که تعداد بلوکهای منابع فیزیکی به نسبت کاربران بسیار کم باشد و تداخل به شدت زیاد گردد، الگوریتم مسئله‌ی اول به خوبی قادر به پاسخ‌گویی نیست و از حالت بهینه فاصله می‌گردد. در مسئله‌ی دوم، زمانی که تعداد مراکز داده زیاد گردد فاصله‌ی حالت بهینه از الگوریتم ابتکاری زیاد شده است. همچنین در فصل چهارم صورت مسئله بسیار ساده‌تر از واقعیت است و مسئله در حالت دینامیکی برای تعداد درخواست کم در این حالت حل گردیده است.

۳.۲.۵ نوآوری‌های این پروژه

در این پروژه، تخصیص توان و برش شبکه در شبکه‌های دسترسی باز مورد بررسی قرار گرفته است. ما مسئله‌ی اختصاص UE به خدمات، خدمات به برش‌ها و منابع فیزیکی بی‌سیم و همچنین مرکز داده به برش‌ها را به عنوان

یک مشکل بهینه سازی فرمول‌بندی کرده‌ایم. سپس با ارائه‌ی روشهای ابتکاری، به حل آنها پرداختیم. در نهایت مسئله‌ی ساده شده را در حالت دینامیکی و متغیر با زمان حل کردیم.

۳.۵ پیشنهادات

در این بخش، پیشنهادات و کارهای آتی را بیان خواهیم کرد.

- یکی از کارهای آتی، مدل کردن برش شبکه در ساختار شبکه‌ی دسترسی رادیویی باز و حل آن بوسیله‌ی روش یادگیری تقویتی عمیق می‌باشد. در فصل چهارم از این روش برای سیستم ساده شده استفاده گردیده و به دلیل کم بودن تعداد حالات با استفاده از روش یادگیری تقویتی حل شده و در فصل سوم نیز مدل سیستم بیان شده، یکی از کارهای بعدی این است که سیستم مدل فصل سوم را به سیستمهای رادیویی باز نزدیکتر کرده و با روش یادگیری تقویتی عمیق حل نماییم. که در اینجا، بدست آوردن توان و ارتباط برش با سرویس از این روش بدست خواهد آمد. همچنین مقایسه‌ی روش یادگیری تقویتی عمیق و یادگیری تقویتی در اینجا نیز مورد توجه قرار خواهد گرفت.
- یکی دیگر از کارهای آتی، بدست آوردن پارامترهای کیفیت سرویس ^۲QoS در شبکه‌های دسترسی باز می‌باشد که شامل تاخیر انتها به انتها، میزان از دست دادن بسته‌ها^۳، قابلیت اطمینان و ... می‌باشد. در اینجا می‌توان تاخیر را هم در بخش رادیویی هم در بخش هسته‌ی شبکه بدست آورد. همچنین، به منظور نشان دادن نقش هوش در ORAN طرح مدیریت هوشمند منابع رادیویی را برای کنترل تراکم ترافیک و نشان دادن کارایی آن در یک مجموعه داده واقعی از یک اپراتور بزرگ بدست می‌آوریم.
- شبکه تعریف شده توسط نرم افزار (SDN) و مجازی سازی عملکرد شبکه (NFV) فناوری های کلیدی امکان پذیر در شبکه های ارتباطی نسل پنجم (۵G) برای قرارگیری برش های شبکه سفارشی در سطح سرویس در زیرساخت شبکه، بر اساس خواسته های منابع آماری برای تأمین کیفیت طولانی مدت خدمات (QoS) مورد نیاز می‌باشد. با این حال، بارهای ترافیکی در برش های مختلف با گذشت زمان تحت تغییر قرار می‌گیرند، در نتیجه چالش هایی برای تأمین کیفیت مداوم ایجاد می‌شود. در کارهای آتی یک مشکل انتقال جریان پویا برای سرویس های متصل شده به برش شبکه، برای پاسخگویی به نیازهای تأخیر پایان انتها به انتها (E2E) با ترافیک متغیر، مورد بررسی قرار خواهد گرفت.

^۲Quality of Service

^۳Packet Loss

- یکی دیگر از کارهای آتی، تخصیص منابع به روش توزیع شده برای برش شبکه از منابع محاسباتی و منابع دیگر همانند پهنای باند می‌باشد. همچنین از روش توزیع شده در لینک فراسو^۴ برای تخصیص توان کاربران، تخصیص پهنای باند و ... استفاده می‌گردد. یکی از روشها، استفاده از Distributed ADMM می‌باشد که در این روش تعدادی عامل به صورت همکارانه سعی در حل یک معادله‌ی بهینه‌سازی مشترک دارند که تابع هدف مجموعی از مقدارهای خصوصی هر عامل می‌باشد.

⁴Uplink

کتاب نامه

- [1] (2020) Standard of etsi. [Online]. Available: <https://www.etsi.org/technologies/5g?jjj=1590472780060>
- [2] A. Checko, H. L. Christiansen, Y. Yan, L. Scolari, G. Kardaras, M. S. Berger, and L. Dittmann, “Cloud ran for mobile networks—a technology overview,” *IEEE Communications surveys & tutorials*, vol. 17, no. 1, pp. 405–426, 2015.
- [3] M. Peng, Y. Li, J. Jiang, J. Li, and C. Wang, “Heterogeneous cloud radio access networks: A new perspective for enhancing spectral and energy efficiencies,” *IEEE Wireless Communications*, vol. 21, no. 6, pp. 126–135, 2014.
- [4] M. Peng, S. Yan, K. Zhang, and C. Wang, “Fog-computing-based radio access networks: issues and challenges,” *IEEE Network*, vol. 30, no. 4, pp. 46–53, 2016.
- [5] (2017) vran: The next step in network transformation. [Online]. Available: <https://builders.intel.com/docs/networkbuilders/vran-the-next-step-in-network-transformation.pdf>
- [6] C. C. W. D. R. D. S. G. Chih-Lin I, Sachin Katti, “O-ran white paper: Towards an open and smart ran,” O-RAN Alliance, Tech. Rep., 2018.
- [7] J. G. Herrera and J. F. Botero, “Resource allocation in nfv: A comprehensive survey,” *IEEE Transactions on Network and Service Management*, vol. 13, no. 3, pp. 518–532, 2016.
- [8] Y. Li and M. Chen, “Software-defined network function virtualization: A survey,” *IEEE Access*, vol. 3, pp. 2542–2553, 2015.
- [9] X. Zhou, R. Li, T. Chen, and H. Zhang, “Network slicing as a service: enabling enterprises’ own software-defined cellular networks,” *IEEE Communications Magazine*, vol. 54, no. 7, pp. 146–153, 2016.
- [10] Y. L. Lee, J. Loo, T. C. Chuah, and L.-C. Wang, “Dynamic network slicing for multitenant heterogeneous cloud radio access networks,” *IEEE Transactions on Wireless Communications*, vol. 17, no. 4, pp. 2146–2161, 2018.

- [11] J. Tang, W. P. Tay, T. Q. Quek, and B. Liang, "System cost minimization in cloud ran with limited fronthaul capacity," *IEEE Transactions on Wireless Communications*, vol. 16, no. 5, pp. 3371–3384, 2017.
- [12] Compare different generation. [Online]. Available: <http://net-informations.com/q/diff/generations.html>
- [13] S.-H. Park, O. Simeone, and S. S. Shitz, "Joint optimization of cloud and edge processing for fog radio access networks," *IEEE Transactions on Wireless Communications*, vol. 15, no. 11, pp. 7621–7632, 2016.
- [14] (2018) xran forum merges with c-ran alliance to form oran alliance. [Online]. Available: <https://www.businesswire.com/news/home/20180227005673/en/xRAN-Forum-Merges-C-RAN-Alliance-Form-ORAN>
- [15] Next generation ran architecture. [Online]. Available: <http://rod-stuhlmuller-nydh.squarespace.com/>
- [16] R. Mijumbi, J. Serrat, J.-L. Gorricho, N. Bouten, F. De Turck, and R. Boutaba, "Network function virtualization: State-of-the-art and research challenges," *IEEE Communications surveys & tutorials*, vol. 18, no. 1, pp. 236–262, 2015.
- [17] W. Xia, Y. Wen, C. H. Foh, D. Niyato, and H. Xie, "A survey on software-defined networking," *IEEE Communications Surveys & Tutorials*, vol. 17, no. 1, pp. 27–51, 2014.
- [18] V.-G. Nguyen, A. Brunstrom, K.-J. Grinnemo, and J. Taheri, "Sdn/nfv-based mobile packet core network architectures: A survey," *IEEE Communications Surveys & Tutorials*, vol. 19, no. 3, pp. 1567–1602, 2017.
- [19] A. Gudipati, D. Perry, L. E. Li, and S. Katti, "Softtran: Software defined radio access network," in *Proceedings of the second ACM SIGCOMM workshop on Hot topics in software defined networking*, 2013, pp. 25–30.
- [20] R. Yu, G. Xue, M. Bennis, X. Chen, and Z. Han, "Hsdran: Hierarchical software-defined radio access network for distributed optimization," *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, vol. 67, no. 9, pp. 8623–8636, 2017.
- [21] H. Zhang, N. Liu, X. Chu, K. Long, A.-H. Aghvami, and V. C. Leung, "Network slicing based 5g and future mobile networks: mobility, resource management, and challenges," *IEEE communications magazine*, vol. 55, no. 8, pp. 138–145, 2017.

- [22] P. C. Chu and J. E. Beasley, "A genetic algorithm for the multidimensional knapsack problem," *Journal of heuristics*, vol. 4, no. 1, pp. 63–86, 1998.
- [23] J. O. Berkey and P. Y. Wang, "Two-dimensional finite bin-packing algorithms," *Journal of the operational research society*, vol. 38, no. 5, pp. 423–429, 1987.
- [24] M. Peng, Y. Li, Z. Zhao, and C. Wang, "System architecture and key technologies for 5g heterogeneous cloud radio access networks," *IEEE network*, vol. 29, no. 2, pp. 6–14, 2015.
- [25] L. M. Larsen, M. S. Berger, and H. L. Christiansen, "Fronthaul for cloud-ran enabling network slicing in 5g mobile networks," *Wireless Communications and Mobile Computing*, vol. 2018, 2018.
- [26] S. Costanzo, I. Fajjari, N. Aitsaadi, and R. Langar, "A network slicing prototype for a flexible cloud radio access network," in *2018 15th IEEE Annual Consumer Communications & Networking Conference (CCNC)*. IEEE, 2018, pp. 1–4.
- [27] H. Xiang, S. Yan, and M. Peng, "A realization of fog-ran slicing via deep reinforcement learning," *IEEE Transactions on Wireless Communications*, vol. 19, no. 4, pp. 2515–2527, 2020.
- [28] S. E. Elayoubi, S. B. Jemaa, Z. Altman, and A. Galindo-Serrano, "5g ran slicing for verticals: Enablers and challenges," *IEEE Communications Magazine*, vol. 57, no. 1, pp. 28–34, 2019.
- [29] S. D'Oro, F. Restuccia, and T. Melodia, "Toward operator-to-waveform 5g radio access network slicing," *IEEE Communications Magazine*, vol. 58, no. 4, pp. 18–23, 2020.
- [30] L. Feng, Y. Zi, W. Li, F. Zhou, P. Yu, and M. Kadoch, "Dynamic resource allocation with ran slicing and scheduling for urllc and embb hybrid services," *IEEE Access*, vol. 8, pp. 34 538–34 551, 2020.
- [31] V. Sciancalepore, L. Zanzi, X. Costa-Perez, and A. Capone, "Onets: online network slice broker from theory to practice," *arXiv preprint arXiv:1801.03484*, 2018.
- [32] W. Li, Y. Zi, L. Feng, F. Zhou, P. Yu, and X. Qiu, "Latency-optimal virtual network functions resource allocation for 5g backhaul transport network slicing," *Applied Sciences*, vol. 9, no. 4, p. 701, 2019.
- [33] D. Sattar and A. Matrawy, "Towards secure slicing: Using slice isolation to mitigate ddos attacks on 5g core network slices," in *2019 IEEE Conference on Communications and Network Security (CNS)*. IEEE, 2019, pp. 82–90.

- [34] —, “Optimal slice allocation in 5g core networks,” *IEEE Networking Letters*, vol. 1, no. 2, pp. 48–51, 2019.
- [35] P. Luong, C. Despins, F. Gagnon, and L.-N. Tran, “A novel energy-efficient resource allocation approach in limited fronthaul virtualized c-rans,” in *2018 IEEE 87th Vehicular Technology Conference (VTC Spring)*. IEEE, 2018, pp. 1–6.
- [36] P. Luong, F. Gagnon, C. Despins, and L.-N. Tran, “Joint virtual computing and radio resource allocation in limited fronthaul green c-rans,” *IEEE Transactions on Wireless Communications*, vol. 17, no. 4, pp. 2602–2617, 2018.
- [37] K. Guo, M. Sheng, J. Tang, T. Q. Quek, and Z. Qiu, “Exploiting hybrid clustering and computation provisioning for green c-ran,” *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*, vol. 34, no. 12, pp. 4063–4076, 2016.
- [38] I. Scales. (2018) The open ran (oran) alliance formed to lever open 5g for ‘other’ technologies? and much more... [Online]. Available: <https://www.o-ran.org/resources>
- [39] S. Niknam, A. Roy, H. S. Dhillon, S. Singh, R. Banerji, J. H. Reed, N. Saxena, and S. Yoon, “Intelligent o-ran for beyond 5g and 6g wireless networks,” *arXiv preprint arXiv:2005.08374*, 2020.
- [40] L. Gavrilovska, V. Rakovic, and D. Denkovski, “From cloud ran to open ran,” *Wireless Personal Communications*, pp. 1–17, 2020.
- [41] S. Sree and S. Ponnekanti, “Open ran deployment using advanced radio link manager framework to support mission critical services in 5g,” *EAI Endorsed Transactions on Cloud Systems*, vol. 5, no. 14, 2019.
- [42] S. A. T. Kawahara and A. U. R. Matsukawa, “O-ran alliance standardization trends,” 2019.
- [43] X. Wang, C. Wu, F. Le, A. Liu, Z. Li, and F. Lau, “Online vnf scaling in datacenters,” in *2016 IEEE 9th International Conference on Cloud Computing (CLOUD)*. IEEE, 2016, pp. 140–147.
- [44] Y. Jia, C. Wu, Z. Li, F. Le, and A. Liu, “Online scaling of nfvi service chains across geo-distributed datacenters,” *IEEE/ACM Transactions on Networking*, vol. 26, no. 2, pp. 699–710, 2018.
- [45] Z. Luo and C. Wu, “An online algorithm for vnf service chain scaling in datacenters,” *IEEE/ACM Transactions on Networking*, 2020.

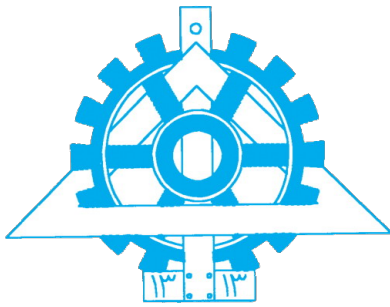
- [46] R. Cziva, C. Anagnostopoulos, and D. P. Pazaros, "Dynamic, latency-optimal vnf placement at the network edge," pp. 693–701, 2018.
- [47] J. Pei, P. Hong, M. Pan, J. Liu, and J. Zhou, "Optimal vnf placement via deep reinforcement learning in sdn/nfv-enabled networks," *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*, vol. 38, no. 2, pp. 263–278, 2019.
- [48] B. Ren, S. Gu, D. Guo, G. Tang, and X. Lin, "Joint optimization of vnf placement and flow scheduling in mobile core network," *IEEE Transactions on Cloud Computing*, 2020.
- [49] V. Sciancalepore, K. Samdanis, X. Costa-Perez, D. Bega, M. Gramaglia, and A. Banchs, "Mobile traffic forecasting for maximizing 5g network slicing resource utilization," in *IEEE INFOCOM 2017-IEEE Conference on Computer Communications*. IEEE, 2017, pp. 1–9.
- [50] K. Wang, W. Zhou, and S. Mao, "On joint bbu/rrh resource allocation in heterogeneous cloud-rans," *IEEE Internet of Things Journal*, vol. 4, no. 3, pp. 749–759, 2017.
- [51] A. De Domenico, Y.-F. Liu, and W. Yu, "Optimal virtual network function deployment for 5g network slicing in a hybrid cloud infrastructure," *arXiv preprint arXiv:2006.08774*, 2020.
- [52] Y. Hua, R. Li, Z. Zhao, X. Chen, and H. Zhang, "Gan-powered deep distributional reinforcement learning for resource management in network slicing," *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*, vol. 38, no. 2, pp. 334–349, 2019.
- [53] Y. Hua, R. Li, Z. Zhao, H. Zhang, and X. Chen, "Gan-based deep distributional reinforcement learning for resource management in network slicing," in *2019 IEEE Global Communications Conference (GLOBECOM)*. IEEE, 2019, pp. 1–6.
- [54] T. Li, X. Zhu, and X. Liu, "An end-to-end network slicing algorithm based on deep q-learning for 5g network," *IEEE Access*, vol. 8, pp. 122 229–122 240, 2020.
- [55] M. K. Motalleb, A. Kabiri, and M. J. Emadi, "Optimal power allocation for distributed mimo c-ran system with limited fronthaul capacity," in *2017 Iranian Conference on Electrical Engineering (ICEE)*. IEEE, 2017, pp. 1978–1982.
- [56] P.-R. Li, T.-S. Chang, and K.-T. Feng, "Energy-efficient power allocation for distributed large-scale mimo cloud radio access networks," in *2014 IEEE Wireless Communications and Networking Conference (WCNC)*. IEEE, 2014, pp. 1856–1861.
- [57] O. Simeone, J. Kang, J. Kang, and S. Shamai, "Cloud radio access networks: Uplink channel estimation and downlink precoding," *arXiv preprint arXiv:1608.07358*, 2016.

- [58] S.-H. Park, O. Simeone, O. Sahin, and S. S. Shitz, "Fronthaul compression for cloud radio access networks: Signal processing advances inspired by network information theory," *IEEE Signal Processing Magazine*, vol. 31, no. 6, pp. 69–79, 2014.
- [59] M. Gabay and S. Zaourar, "Vector bin packing with heterogeneous bins: application to the machine reassignment problem," *Annals of Operations Research*, vol. 242, no. 1, pp. 161–194, 2016.
- [60] D. W. K. Ng, E. S. Lo, and R. Schober, "Energy-efficient resource allocation for secure ofdma systems," *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, vol. 61, no. 6, pp. 2572–2585, 2012.
- [61] P. R. Montague, "Reinforcement learning: an introduction, by sutton, rs and barto, ag," *Trends in cognitive sciences*, vol. 3, no. 9, p. 360, 1999.

Abstract

Open radio access network (ORAN) alliance which has been formed recently establishes a flexible, open, and smart radio access network (RAN) by combining the ideas from xRAN and cloud RAN (C-RAN). ORAN divides the functions of the RAN into three parts, namely remote unit (RU), distributed unit (DU), and central unit (CU). While RU contains lower PHY functions, DU contains higher PHY, MAC, and RLC and CU contains RRC, PDCP, and SDAP. CU and DU are implemented as virtual network functions (VNFs) running on a cloud environment. Interfaces between RU, CU, and DU are open standard interfaces. Network slicing as a new concept in 5G systems is used to share the network resources between various services while the operation of one service does not affect another service. In this paper, we study the problem of RAN network slicing in an ORAN system. We formulate the problem of wireless link scheduling, assigning the slices to the services, and assigning the physical data centers resource to slices which is 3D-bin packing problems. The objective is to jointly maximize the energy efficiency and minimize power consumption of RUs and the cost of physical resources in a downlink channel. The problem is formulated as a mixed-integer optimization problem that can be decomposed into two independent sub-problems. Heuristic algorithms are proposed for each of the sub-problems.

Keywords ORAN, Network Slicing, Bin Packing



University of Tehran
College of Engineering
Faculty of Electrical and
Computer Engineering
Network department



Joint Power Allocation and Network Slicing in an End-to-End ORAN System

A Proposal submitted to the Graduate Studies Office to continue Doctor
of Philosophy
in Electrical Engineering - Communication and Network

By:

Mojdeh Karbalaee Motalleb

Supervisor:

Dr. Shahmansouri

September 2020