

ادغام محاسبات لبه ای با دسترسی چندگانه (MEC) در هسته باز 5G

روبن خاویر^{۱،۲}، روجریو اس. سیلوا^{۱،۳}، ماریا ریبریو^{۱،۴}، والدر موریرا^{۱،۵}، لئاندریو فریتاس^{۱،۶} و آنتونیو اولیویرا-جونیه^{۱،*}

^۱ موسسه انفورماتیک (INF)، دانشگاه فدرال گوپاس (UFG)، گویانا 900-74690، برزیل؛
 rogerio.sousa@ifg.edu.br (RSS)؛ rubenfx@cpqd.com.br (RX)
^۲ IFG، Inhumas 75402-556، برزیل. leandro.freitas@ifg.edu.br
^۳ Inhumas پردیس برزیل، 13086-902، (Campinas) CPQD، (Campinas) CPQD، e Desenvolvimento em Telecomunicações
 Centro de Pesquisa
^۴ موسسه مهندسی، فناوری و علوم سیستم ها و کامپیوتر (INESC-TEC)، پورتو، پرتغال، کد پستی ۴۶۵-۴۲۰۰؛
 maria.r.ribeiro@inesctec.pt
^۵ Fraunhofer Portugal AICOS، 4200-135 پرتغال؛ پورتو، waldir.junior@fraunhofer.pt
 * مکاتبات: antoniojr@ufg.br

چکیده: محاسبات لبه ای با دسترسی چندگانه (MEC) مفهوم اصلی است که امکان ایجاد برنامه ها و سرویس های جدیدی را فراهم می کند که مزایای محاسبات لبه ای را برای شبکه ها و کاربران به ارمغان می آورد. با پیاده سازی برنامه ها و سرویس هادر لبه، نزدیک به کاربران و دستگاه های آنها، می توان از تأخیر بسیار کم، پهنای باند قابل توجه و استفاده بهینه از منابع بهره مند شد. با این حال، فعال کردن این رویکرد نیازمند ادغام دقیق بین چارچوب MEC و هسته باز 5G است. این کار به طراحی سرویس جدیدی اختصاص داده شده است که عملکرد API هدایت ترافیک با دسترسی چندگانه (MTS) را گسترش می دهد و به عنوان یک پل استراتژیک بین قلمروهای MEC و هسته 5G عمل می کند. برای دستیابی به این هدف، ما از free5GC (پروژه متن باز برای هسته 5G) به عنوان هسته 5G خود که در خوشه Kubernetes مستقر شده است، استفاده می کنیم. سرویس پیشنهادی با استفاده از این چارچوب، شامل سناریوهایی با تراکم بالای کاربر، اعتبارسنجی می شود. برای نتیجه گیری در مورد اینکه آیا راه حل مورد بحث معتبر است یا خیر، از KPIهای برنامه های 5G MEC که در جامعه علمی شرح داده شده اند، به عنوان یک پارامتر مقایسه استفاده شد. نتایج نشان می دهد که این سرویس به طور مؤثر به مسائل شرح داده شده می پردازد و در عین حال امکان سنجی خود را در موارد استفاده مختلف مانند سلامت الکترونیک، پشتیبانی امدادگران، خانه هوشمند و مزارع هوشمند نشان می دهد.



استناد: خاویر، ر.؛ سیلوا، آر. اس.؛ ریبریو، م.؛ موریرا، دلیو.؛ فریتاس، ل.؛ اولیویرا-جونیه، آ. ادغام محاسبات لبه ای با دسترسی چندگانه (MEC) در هسته باز 5G. *مخابرات* ۵، ۲۰۲۴، ۱۰.3390/telecom5020022، ۴۳۳-۴۵۰. <https://doi.org>

کلمات کلیدی: هسته 5G؛ MEC؛ ادغام؛ سرویس؛ MTS؛ API

ویراستار علمی: ماریو ای. ریورو-آنجلز

۱. مقدمه

نسل پنجم شبکه ها (5G) به عنوان پلتفرم اصلی برای کاربردهای بی سیم آینده در نظر گرفته می شود که هدف آن ارائه حداکثر نرخ داده تا 20 گیگابیت بر ثانیه، میانگین نرخ بیش از 100 مگابیت بر ثانیه و اتصال تعداد زیادی دستگاه اینترنت اشیا (IoT) در واحد سطح است. علاوه بر این، کاهش مصرف باتری دستگاه، کاهش مصرف انرژی و امکان اتصال تعداد بسیار زیادی دستگاه نیز بخشی از اهداف هستند [۲].

در آینده، شبکه های 6G به پیشرفت خود ادامه خواهند داد تا بتوانند تقاضاهای رو به رشد نرخ داده، افزایش تعداد برش های نمونه سازی شده، تراکم دستگاه ها و حسگرهای متصل را مدیریت کنند [۳]. این امر مستلزم آن است که 6G در مقیاس بسیار بزرگ و به شیوه ای فوق متصل و خودمختار عمل کند، به دنبال ادغام دنیای دیجیتال و واقعی در تمام ابعاد و به طور فراگیر باشد، شبکه های فضایی و زمینی را به شدت ادغام کند و همچنین از فناوری های مکان یابی، حسگری و هوش مصنوعی به طور گسترده استفاده کند [۴].

مطالعات اخیر در شبکه های MEC، 6G را به عنوان یک عامل ضروری برای ادغام در 6G جهت برآورده کردن الزامات چنین لبه های شبکه مترakمی برجسته می کند. [۳-۵]، به عنوان مثال، MEC می تواند تضمین کند

دریافت: ۲۶ آوریل ۲۰۲۴
 اصلاح شده: ۲۸ مه ۲۰۲۴
 پذیرفته شده: ۳۰ مه ۲۰۲۴
 منتشر شده: ۳ ژوئن ۲۰۲۴

حق نشر: © ۲۰۲۴ توسط نویسندگان. دارنده مجوز MDPI، بازل، سوئیس. این مقاله یک مقاله با دسترسی آزاد است تیکل که تحت شرایط مجوز / licenses/b 4.0/ و http://creativecommons.org BY) (CC Creative Comm Attribution) CC :ها. // توزیع شده است. / ی

تأخیر انتقال فوق العاده کم و پخش بی نقص ویدیوهای 4k/8k را با پردازش داده های محاسباتی فشرده یا ذخیره سازی ویدیوهای با کیفیت فوق العاده بالا (UHD) در لبه [] برآورده می کند. [۳]. شبکه تلفن همراه 5G که توسط پروژه مشارکت نسل سوم (3GPP) استاندارد شده است، نسخه های مختلفی دارد که جنبه های شبکه را تعریف می کنند. یکی از این جنبه ها، معماری جدیدی است که جدایی بین صفحه داده (DP) و صفحه کنترل (CP) را معرفی می کند که SBA نامیده می شود [۶] علاوه بر این، نسل جدیدی از خدمات برای 5G ارائه شده است، از جمله (i) eMBB: به حداکثر رساندن نرخ انتقال داده؛ (ii) URLLC: به حداقل رساندن تأخیر و تضمین قابلیت اطمینان بالا؛ (iii) mMTC: پشتیبانی از تعداد زیادی دستگاه در همان منطقه [۸،۷].

ظهور شبکه های 5G امکانات مختلفی را برای پیاده سازی برنامه ها و خدمات جدید، مانند واقعیت مجازی، واقعیت افزوده، وسایل نقلیه خودران و اینترنت اشیا، فراهم کرده است. این برنامه ها به منابع شبکه قابل توجهی نیاز دارند و شبکه را ملزم به پشتیبانی از حجم فزاینده داده ها می کنند. ویژگی هایی مانند تأخیر بسیار کم، پهنای باند وسیع و مصرف منابع کارآمد باید توسط یک شبکه 5G ارائه شود [۹] یک رویکرد مؤثر، استقرار این برنامه ها در لبه شبکه، نزدیک تر کردن آنها به کاربران و بهره گیری از محاسبات لبه و کاهش زمان انتقال فیزیکی است. اینجاست که محاسبات لبه با دسترسی چندگانه (MEC) بسیار مهم می شود [۱۰].

محاسبات لبه ای به عنوان یک تکامل امیدوارکننده در محاسبات ابری ظهور کرده است و مزایایی مانند مقیاس پذیری بهبود یافته، به ویژه برای حجم زیادی از داده ها، و تأخیرهای کمتر را ارائه می دهد که امکان خدمات حیاتی بلادرنگ مانند سنجش از دور و فعال سازی یا بازی های توزیع شده را فراهم می کند، و همچنین حریم خصوصی و اطلاعات زمینه ای را حفظ می کند. [۱۱] استاندارد شده است، خدمات را در لبه شبکه به منبع داده نزدیک تر می کند ETSI ISG که توسط MEC [۱۲] این استاندارد شامل یک چارچوب و معماری جامع است. [۱۳] علاوه بر این، مجموعه ای از API های MEC وجود دارد که مطابق با اصول کلی طراحی RESTful API طراحی شده اند [۱۴].

قابل دسترسی است، LTE-Advanced، عمدتاً از طریق شبکه های تلفن همراه، مانند 4 MEC [۱۵] و شبکه رو به رشد 5G [۱۶] اگرچه از نظر حالت دسترسی خنثی است [۱۱] بسیار مهم هستند URLLC طراحی شده است، به ویژه در پرداختن به الزاماتی مانند تأخیر بسیار کم که برای لبه ای شبکه یک راهکار مستقل باشد، برای تکمیل 5 MEC [۱۷] در این زمینه، ادغام بین شبکه های 5G و چارچوب های MEC ضروری می شود و می تواند از طریق سرویس های MEC مطابق با معماری مرجع ETSI پیاده سازی شود.

علاوه بر این، اپراتورها می توانند از امکانات موجود در لبه شبکه های تلفن همراه استفاده کنند و RAN را برای اشخاص ثالث باز کنند و امکان استقرار انعطاف پذیر خدمات نوآورانه را برای مشترکین و مشاغل تلفن همراه فراهم کنند. [۱۸]. هنگام پیاده سازی MEC در شبکه های تلفن همراه، میزبان ها در لبه شبکه (نزدیک شبکه دسترسی رادیویی 4G یا 5G) قرار می گیرند، از برنامه های MEC پشتیبانی می کنند و از API هایی مانند اطلاعات شبکه رادیویی (RNI) و API های مکان استفاده می کنند. سایر API ها با پیروی از اصول طراحی RESTful در معرض دید قرار می گیرند و قابلیت همکاری و قابلیت حمل برنامه های MEC را در دامنه های مختلف تضمین می کنند. [۱۱].

این کار بر اساس مزایای استفاده از MEC در شبکه است. این مزایا، به ویژه کاهش قابل توجه انتقال محتوای تکراری در لینک های backhaul، کیفیت خدمات (QoS) را افزایش می دهد و منجر به کاهش تأخیر و بار محاسباتی می شود [۹، ۱۸، ۱۹] استفاده از شبکه های داده تلفن همراه شاهد یک موج جهانی است. به عنوان مثال، در برزیل، طبق گزارش آژانس ملی مخابرات (ANATEL)، افزایش دسترسی به پهنای باند تلفن همراه وجود داشته است و تنها در عرض یک ماه از 211.8 میلیون به 213.7 میلیون افزایش یافته است. [۲۰] پیش بینی می شود که تا سال ۲۰۲۶، ۵۴ درصد از ترافیک داده های تلفن همراه از طریق شبکه های 5G تسهیل شود و این امر اپراتورها را بر آن می دارد تا برای پاسخگویی به این تقاضای رو به رشد، چه برای کاربران و چه برای زیرساخت ها، به دنبال پیشرفت هایی باشند. [۲۱]. بر این اساس، ادغام شبکه های 5G و چارچوب های MEC هم برای جامعه دانشگاهی و هم برای توسعه فناوری های جدید، مانند وسایل نقلیه خودران، برنامه های کاربردی برای شهرهای هوشمند، مراقبت های بهداشتی و بازار واقعیت افزوده/مجازی و همچنین برای کل بازار مفید است. آمازون در تحقیقات خود دریافت که هر 100 میلی ثانیه تأخیر در وب سایت هایش 1٪ از فروش آن را به همراه دارد، در حالی که گوگل نتیجه گرفت که 0.5 ثانیه اضافی در زمان بارگذاری صفحه جستجو منجر به کاهش 20 درصدی ترافیک کاربران می شود [۲۲] پیش بینی می شود که موارد استفاده خاصی در شبکه های 5G برای تأمین، به مفاهیم و چارچوب های MEC وابسته شوند.

از خدمات به کاربران نهایی [۲۳]. مثال‌ها شامل وسایل نقلیه خودران، شهرهای هوشمند، مراقبت‌های بهداشتی و اینترنت اشیا (IoT) می‌شوند که همگی حساسیت به تأخیر را نشان می‌دهند و می‌توانند از اتخاذ اصول MEC در استقرار خود، دستاوردهای قابل توجهی کسب کنند. به عنوان مثال، این موارد در حوزه خدمات ارتباطات با تأخیر بسیار کم و قابل اعتماد (URLLC) آشکار می‌شوند [۲۴].

برای دستیابی به اهداف این کار، ما با بررسی ویژگی‌های MEC و فناوری 5G شروع کردیم. ما اجزای نرم افزاری را در معماری آنها تجزیه و تحلیل کردیم و اهداف و ویژگی‌های آنها را درک کردیم. هسته شبکه انتخاب شده به دلیل کد منبع باز، انطباق با استانداردهای 3GPP و جامعه فعال، free5GC (پروژه متن باز برای هسته 5G) بود. این انتخاب با استفاده از my5G-core (یک هسته مستقل 5G که از استانداردهای 3GPP پیروی می‌کند) تقویت شد [1]. [۲۵، ۱۷] که انشعابی از free5GC است. تحقیقاتی برای شناسایی پلتفرم‌های MEC که اهداف این مطالعه را برآورده می‌کنند، انجام شد. با این حال، فقدان مستندات و پشتیبانی منجر به شبیه سازی یک پلتفرم MEC با استفاده از یک خوشه Kubernetes شد. سرویس پیشنهادی بر اساس استانداردها و پایبندی به اهداف API هدایت ترافیک چند دسترسی (MTS) توسعه داده شد. علاوه بر این، یک رجیستری سرویس (SR) برای ایجاد محیط اعتبارسنجی، همراه با یک برنامه آزمایشی ایجاد شد.

اعتبارسنجی به سه بخش تقسیم شد. ابتدا، عملکرد انفرادی free5GC، خوشه Kubernetes و برنامه‌ها / سرویس‌های پیاده سازی شده اعتبارسنجی شدند. متعاقباً، ثبت برنامه‌ها / سرویس‌ها در SR اعتبارسنجی شد. در نهایت، بخش سوم و آخر شامل اعتبارسنجی سرویس پیشنهادی و جمع آوری و ارزیابی نتایج بود. جزئیات بیشتر در مورد محیط ارزیابی و تمام کد منبع به صورت عمومی در مخزن GitHub () در دسترس است. <https://github.com/LABORA-INF-UFG/5g-mecintegration> (دسترسی در ۲۵ آوریل ۲۰۲۴).

مشارکت‌های این اثر به شرح زیر است:

- ادغام بین MEC و 5G: این مطالعه امکان سنجی ادغام 5G و MEC را از طریق یک API ارتباطی نشان می‌دهد.
- پیاده سازی سرویس یکپارچه سازی: یکی از رویکردها برای تحقق یکپارچه سازی بین MEC و فناوری 5G، پیاده سازی یک سرویس خاص است. این سرویس می‌تواند با استفاده از یک API ارتباطی اختصاصی ارائه شود.
- گسترش API: MTS اصلی MTS برای هدایت ترافیک برنامه‌ها به 5G طراحی نشده بود. بنابراین، برای فعال کردن انتقال ترافیک بین MEC و شبکه 5G، لازم است این API با ایجاد یک سرویس خاص جدید ارتقا یابد.
- اعتبارسنجی API در یک محیط آزمایشی: API پیشنهادی در یک محیط آزمایشی با استفاده از یک چارچوب MEC شبیه سازی شده و یک 5G اعتبارسنجی شد.

این مقاله به شرح زیر ساختار یافته است: بخش ۲ مفاهیم اساسی لازم برای درک این اثر را ارائه می‌دهد. بخش ۳ مروری بر ادبیات مربوط به این کار ارائه می‌دهد. بخش ۴ طرح پیشنهادی این کار، شامل معماری، جزئیات پیاده سازی و عملکرد آن را شرح می‌دهد. بخش ۵ موارد استفاده مورد استفاده برای اهداف مقایسه، محیط بستر آزمایش، معیارهای ارزیابی و نتایج جمع آوری شده را ارائه می‌دهد و پیامدهای آنها را مورد بحث قرار می‌دهد. بخش ۶ مقاله را به پایان می‌رساند.

۲. سیستم 5G

سیستم موسوم به 5GS (5G شامل شبکه اصلی) 5GC (5G)، یک رابط رادیویی جدید به نام New Radio 5G و تجهیزات کاربری (UE) است که به طور خاص برای 5G طراحی شده اند. ۲۶، ۱۷ سیستم‌های نسل پنجم در حال توسعه هستند تا ارتباط بین UE و زیرساخت شبکه 5G برقرار شود. [۱۷].

در نسخه ۱۶، پروژه مشارکت نسل سوم (3GPP) بر گسترش جامع 5GS تمرکز داشت. این گسترش شامل دسترسی 5G مبتنی بر ماهواره، خدمات ارتباطی خودرو به همه چیز (V2X)، ادغام شبکه‌های بی سیم و سیمی با 5G و سایر پیشرفت‌ها می‌شود. [۲۷] علاوه بر این، قابلیت‌هایی مانند استفاده از فناوری NR در فرکانس‌های بدون مجوز، رویکردهای دسترسی یکپارچه به یک حال (IAB)، بهبودهای چند ورودی-چند خروجی (MIMO) در مقیاس بزرگ، تخصیص منابع بخش بندی شده و قابلیت‌های جدید برای URLLC و اینترنت اشیا صنعتی و همچنین پشتیبانی از شبکه خصوصی (NPN) نیز ارائه شده است.

پیاده سازی ها، گنجانده شده اند [۲۷] این ویژگی ها برای اطمینان از برآورده شدن الزامات اساسی شبکه ها بسیار مهم تلقی می شوند.

۲.۱ هسته 5G

شبکه 5G دارای یک معماری نوآورانه به نام SBA است که حول محور سرویس ها و ریزسرویس ها می چرخد. [۶]. در این مدل، 5G ویژگی هایی مانند جداسازی بین DP و CP، مجازی سازی تابع و برش شبکه (NS) را معرفی می کند [۱۷].

[مزایایی مانند بهبود بهره وری توسعه و نگهداری، ارتباط میکروسرویس ها با منابع اختصاصی و چرخه های حیات مستقل و افزایش مقیاس پذیری از طریق نمونه های درخواستی را ارائه می دهد SBA این ساختار شامل توابع شبکه (NF) است که از طریق رابط مبتنی بر سرویس (SBI) خدمات ارائه می دهند و از طریق API ها و پروتکل هایی مانند REST، HTTP و سایر موارد قابل دسترسی هستند. [۱۷].

[مجازی سازی و محاسبات لبه پشتیبانی می کند، NS است که به طور بومی از SBA که بر اساس مفاهیم محاسبات ابری ساخته شده است، دارای یک هسته سرویس گرا با معماری GS است. GS 5 بخش جدایی ناپذیر 5 NR (New Radio) در کنار رابط رادیویی 5G 28 معماری GS 5 به دو حالت تقسیم می شود: غیرمستقل (NSA)، که در آن رابط رادیویی جدید در ارتباط با زیرساخت اصلی موجود (EPC—Packet Core Evolved) استفاده می شود، و مستقل (SA)، که در آن رابط رادیویی به معماری اصلی تازه پیشنهاد شده برای 5G متصل می شود.

۲.۲ توابع شبکه

[برای مجازی سازی عملکردهای شبکه، از جمله موارد مرتبط با انتقال، دسترسی و هسته، که به طور سنتی بر روی سخت افزار بسته اجرا می شدند، بهره می برد (SDN) و شبکه های تعریف شده توسط نرم افزار (NFV) از اصول مجازی سازی عملکرد شبکه 5G 29]. نمونه ای از تعامل بین MEC و 5G در تابع شبکه (NF) به نام تابع صفحه کاربر (UPF) مشهود است. این تابع به عنوان یک نقطه مرکزی در صفحه کاربر 5G عمل می کند، UE را به شبکه داده (DN) متصل می کند و وظایفی مانند مسیریابی، بازرسی و مدیریت کیفیت خدمات (QoS) را انجام می دهد [۸].

تابع مدیریت جلسه (UPF (SMF را مدیریت می کند و ارتباط بین UE و DN، از جمله تخصیص آدرس های IP و جلسات IP PDU را پیکربندی می کند. ۸. تابع مدیریت دسترسی و تحرک (AMF) یک تابع شبکه است که با شبکه داده و UE تعامل دارد و ثبت، احراز هویت و تحرک در شبکه را از طریق سیگنالینگ امن تسهیل می کند. [۸].

تابع افشای شبکه (NEF) شبکه 5G را رصد می کند تا رویدادها را در معرض برنامه های مجاز و سایر توابع شبکه (NF) قرار دهد و امکان مدیریت قوانین QoS، اولویت ها و اطلاعات مرتبط با UE را فراهم کند. ۸. این توابع با استفاده از مجازی سازی و انعطاف پذیری ارائه شده توسط معماری، برای تضمین عملکرد مؤثر 5G با یکدیگر همکاری می کنند.

برش شبکه (Network Slice) یک فناوری اصلی در زمینه 5G است که امکان ایجاد شبکه های منطقی را بر روی یک زیرساخت مشترک فراهم می کند. ۸. در اصل، بخش های شبکه با هدف برآورده کردن نیازهای خاص مشتری ایجاد می شوند و در نتیجه شبکه های منطقی اختصاصی ایجاد می شوند که در آنها منابع مورد نیاز پیکربندی و تخصیص داده می شوند. [۳۰، ۸].

۲.۳ رابط های شبکه

رابط های شبکه ذکر شده به ارتباطات بین ماژول های نرم افزاری مختلف در 5G اشاره دارند. به طور کلی، هر یک از این ارتباطات از پروتکل ها و استانداردهای خاصی پیروی می کنند. در زمینه اصلی، چهار رابط برجسته هستند - N1، N2، N3 و N4 - هر کدام با عملکردهای استاندارد خود، در حالی که سایر رابط ها در این زمینه پوشش داده نمی شوند.

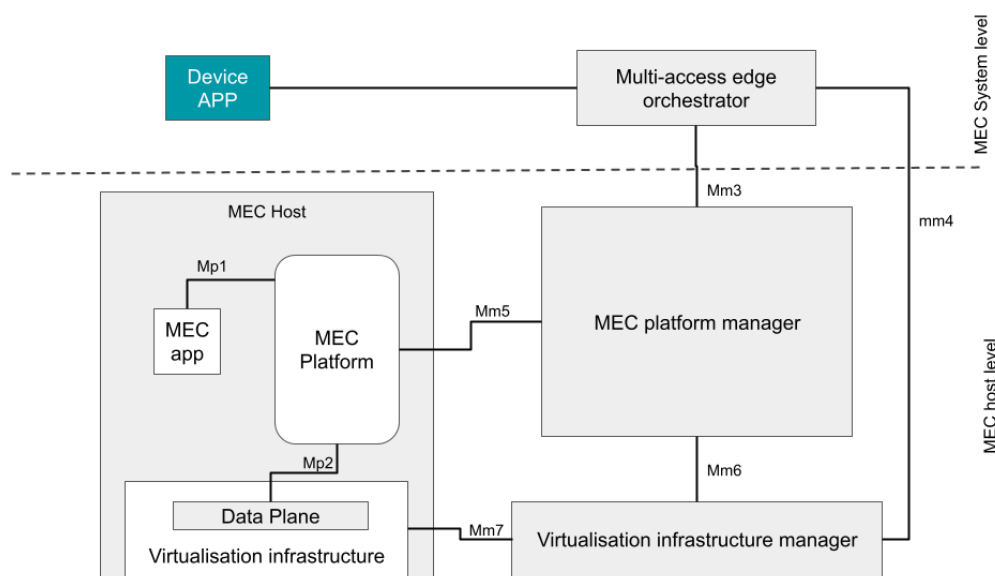
- **ن3**—رابط ارتباطی بین NR و UPF. این رابط داده های کپسوله شده برای مسیریابی را حمل می کند [۸].
- **ن4**—کنترل اعمال شده توسط SMF بر UPF از طریق این رابط انجام می شود و تمام ارتباطات آنها منحصرأ از طریق آن صورت می گیرد [۸].

- **ان۶]** امکان پذیر است (VPN) از طریق این رابط به شبکه های داده خارجی متصل می شود. داده ها در این مرحله دیگر تحت فرآیند کپسوله سازی قرار نمی گیرند، اگرچه پیاده سازی یک شبکه خصوصی مجازی UPF—[۸].
- **ان۹—** در زیرساخت اصلی 5G، می توان UPF ها را در یک پیکربندی متوالی مستقر کرد. این UPF ها از طریق ... به هم متصل هستند. 9 رابط شبکه، و سناریوهای مربوط به تحرک، نمونه هایی هستند که از این رویکرد استفاده می کنند [۸].

۲.۴ معماری مرجع MEC

مشابه MEC، 5G توسط موسسه استانداردهای مخابراتی اروپا (ETSI) استانداردسازی شده است که به استانداردسازی و گسترش مداوم MEC اختصاص دارد. اسناد فنی به طور منظم منتشر می شوند و همه چیز از معماری گرفته تا توسعه خدمات در چارچوب MEC پوشش می دهند.

معماری مرجع MEC به عنوان پایه و اساس ایجاد هر ساختار MEC عمل می کند. شکل ۱ معماری مرجع MEC را به شیوه ای ساده شده به تصویر می کشد و تنها اجزای ضروری برای هدف این مطالعه را نشان می دهد. این معماری در سند [۱] تعریف شده است. ۱۳ اجزای مرتبط مختلفی را می توان در تنظیمات معماری شناسایی کرد، مانند پلتفرم (MEP) MEC، میزبان MEC، مدیر پلتفرم (MEPM) MEC.



شکل ۱. معماری مرجع MEC بر اساس [۱] خلاصه شده است. [۱۳].

میزبان MEC نقش جامعی در معماری MEC ایفا می کند و عناصر حیاتی مانند MEP، مدیر زیرساخت مجازی سازی (VIM) و برنامه های MEC (برنامه MEC) را در بر می گیرد. VIM منابع ذخیره سازی، پردازش و شبکه را برای برنامه های MEC فراهم می کند. همچنین جایی است که DP در آن قرار دارد [۱۳]. است DNS از جمله عملکردهایی مانند سرور MEC، همچنین میزبان سرویس های MEP را تسهیل می کند و آن را مطابق با قوانین ترافیکی دریافتی تنظیم می کند DP نقش محوری در مدیریت، به ویژه در مورد برنامه ها، ایفا می کند. این محیط، محیطی مساعد برای برنامه ها جهت کاوش، ارائه و استفاده از خدمات ایجاد می کند. علاوه بر این، ارتباط با MEP [۱۳].

[۱] و همچنین رسیدگی به نیازهای استانداردسازی و برنامه را بر عهده دارد MEP مدیریت اجزای MEPM می شود. علاوه بر این (MEO) مسئولیت های مرتبط با مدیریت را بر عهده دارد. این شامل نظارت بر چرخه عمر برنامه ها و انتقال اطلاعات به هماهنگ کننده لایه، هماهنگ کننده لایه چند دسترسی MEPM [۱۳] بر اساس الزامات، پیاده سازی، انتقال (در صورت وجود) و خاتمه دادن به برنامه ها است MEC همچنین مسئول انتخاب میزبان های MEO، مستقر شده، سرویس های موجود، منابع و توپولوژی کلی را انجام می دهد MEC بر اساس میزبان های MEC به نوبه خود، وظایف مختلفی مانند حفظ دیدگاه جامع از سیستم، MEO، [۱۳].

۳. کارهای مرتبط

تومازفسکی و همکاران (۲۰۲۰) [۳۱] معماری برای MEC و 5G مبتنی بر معماری مدیریت برش های خودمختار توزیع شده (DASMO) ارائه می دهد [۳۲]. این پیشنهاد بر اساس یک الگوی تک دامنه ای است؛ با این حال، همانطور که در مقاله ذکر شده است، می توان آن را با اضافه کردن یک جزء نرم افزاری دیگر به یک سناریوی چند دامنه ای نیز تعمیم داد. با وجود پیشنهاد مفصل، هیچ بحثی در مورد اعتبارسنجی معماری ارائه شده وجود ندارد و این امر جای خالی در تحقیق باقی می گذارد.

کسنتینی و فرنگودیس یک معماری مدیریت و ارکستراسیون برای NS پیشنهاد می کنند [۲۳]. این معماری یک برش کامل شبکه را به بخش های کوچک تری تقسیم می کند که در آن ها می توان توابع شبکه مجازی (VNF) را مستقر کرد. آن ها دو مدل ارائه می دهند: درون برشی و چند مستأجری، که با نمونه سازی MEP از هم متمایز می شوند. در مدل درون برشی، MEP درون برش نمونه سازی می شود، در حالی که در مدل چند مستأجری، یک MEP مشترک در خارج از برش وجود دارد. MEP با شبکه 5G ارتباط برقرار می کند تا سیاست های هدایت ترافیک را از طریق ارتباط مستقیم با تابع کنترل بسته (PCF) شبکه اصلی یا از طریق تابع نوردی شبکه (NEF) ایجاد کند. هدف این کار، فعال کردن معماری MEC برای پشتیبانی از NS است و با استفاده از (OpenAirInterface) OAI با تطبیق هایی با شبکه اصلی برای ارتباط با MEP از طریق Mp2 اعتبارسنجی شد.

ککی و همکارانش یک معماری یکپارچه سازی بین 5GS و معماری MEC پیشنهاد می دهند [۶]. در این ساختار، هماهنگ کننده MEC می تواند مستقیماً با NEF و در برخی موارد، سایر توابع درون 5GS تعامل داشته باشد. تمرکز اصلی بر ادغام دو سیستم از طریق رابط N6 است که به تابع صفحه کاربر (UPF) متصل می شود. برای MEC، توزیع شده و قابل پیکربندی در نظر گرفته می شود و در برخی از استقرارها، می تواند محلی و بخشی از معماری آن باشد.

مقاله کوکلینسکی و همکاران [۳۳] یک معماری نوآورانه ارائه می دهد که پلتفرم O-RAN، شبکه خودسازمانده (SON)، MEC و NS را ادغام می کند. این پیشنهاد بر اساس کنترلر هوشمند RAN تقریباً بلادرنگ (near-RT RIC) از پلتفرم O-RAN است، با اصلاحاتی برای یکپارچه سازی همه این فناوری ها در یک جزء واحد به نام RIC نزدیک به RT یکپارچه (I-near-RT RIC). برنامه های MEC به عنوان xApps در پلتفرم O-RAN پیاده سازی می شوند. اگرچه این یک پیشنهاد مفهومی است، اما در یک بستر آزمایشی اعتبارسنجی نشده است.

میزان مقایسه بین این اثر و آثار مرتبط بر اساس معیارهای تعریف شده را نشان می دهد:

- پیشنهاد ادغام 5G-MEC - پیشنهادی برای ادغام ارائه شده است.
 - یکپارچه سازی از طریق سرویس - اینکه آیا یکپارچه سازی پیشنهادی به عنوان یک سرویس پیاده سازی می شود یا خیر.
 - ادغام از طریق معماری جدید - چه پیشنهاد ادغام از طریق تغییرات در معماری موجود و چه ایجاد معماری های جدید انجام شود.
 - اعتبارسنجی پیشنهاد - آیا پیشنهاد اعتبارسنجی شده است یا خیر.
 - اعتبارسنجی با 5G SA - آیا اعتبارسنجی با هسته شبکه 5G-SA وجود دارد؟
- اولین جنبه مورد بررسی به موضوع اصلی این مطالعه می پردازد که در آثار ذکر شده در بالا نیز مورد تجزیه و تحلیل قرار گرفته است. واضح است که برخی از این مقالات فقط به ادغام MEC با 5G محدود نمی شوند، بلکه فناوری های دیگری مانند SON را نیز در نظر می گیرند [1]. [۳۳] بنابراین، تمام مقالات مورد بحث در این تحلیل، پیشنهادهایی مربوط به ادغام 5G-MEC ارائه می دهند، اما رویکردهای آنها متفاوت است.
- این مطالعات رویکردهای مختلف ادغام، از جمله پیشنهاد معماری های جدید برای این ادغام را ارزیابی کردند. این مطالعه به دلیل پیشنهاد یک سرویس به عنوان یک راه حل، برجسته است، در حالی که سایر کارها برای ایجاد معماری های جدید یا تطبیق معماری های موجود متمرکز بودند. به عنوان مثال، یک مطالعه از معماری DASMO به عنوان پایه استفاده کرد و مفاهیم کلیدی را دوباره استفاده کرد، در حالی که مطالعه دیگری معماری جدیدی را بر اساس دانش عمومی O-RAN توسعه داد [۳۱، ۳۳] به طور کلی، وجه مشترک همه کارها، ارتباط مستقیم MEP با CP هسته شبکه از طریق رابط MP2 است.

در نهایت، بررسی کردیم که آیا پیشنهادهایی موجود در این مقالات اعتبارسنجی شده اند یا خیر. دو نکته در نظر گرفته شده است: (۱) آیا پیشنهاد به هر نحوی اعتبارسنجی شده است و (۲) آیا پیشنهاد اعتبارسنجی شده از هسته 5G استفاده می کند یا خیر. از این نظر، تنها یک کار مرتبط انجام شده است

پیشنهاد خود را تأیید کرد، که این کار [۲۳]. در این مطالعه، اعتبارسنجی در یک محیط آزمایشی با استفاده از ماشین‌های مختلف به عنوان سرورهای لبه و یک هسته شبکه OAI انجام شد. با این حال، هنگام تجزیه و تحلیل این مطالعه، می‌توان عناصری از معماری هسته بسته تکامل یافته (EPC) هسته‌های شبکه، مانند نهاد مدیریت تحرک (MME) و سرور مشترک خانگی (HSS) را مشاهده کرد. بنابراین، این مطالعه علیرغم اعتبارسنجی، از یک هسته شبکه 5G مستقل (SA) استفاده نمی‌کند. اعتبارسنجی بر توانایی معماری پیشنهادی در ایجاد برش‌های شبکه برای MEC در زمینه 5G و تسهیل ارتباط بین دو فناوری متمرکز بود.

جدول ۱. مقایسه این پیشنهاد با کارهای مرتبط.

آثار

[۱۶] در شبکه‌های 5 MEC		ایکس	ایکس
[۳۱] رویکردی جدید برای ادغام 5G و MEC		ایکس	ایکس
[۲۳] به سوی محاسبات لبه‌ای چند دسترسی با قابلیت برش در 5G		ایکس	ایکس
[۳۳] در مورد ادغام Network Slicing و O-RAN، MEC، SON		ایکس	ایکس
این مقاله		ایکس	ایکس

بنابراین، از تجزیه و تحلیل مطالعات انجام شده، مشخص است که پیشنهاد ما هم به دلیل رویکرد یکپارچه و هم به دلیل اعتبارسنجی آن، برجسته است. ادغام پیشنهادی از طریق یک سرویس پیاده‌سازی شده و در یک محیط آزمایشی با استفاده از هسته شبکه 5G SA اعتبارسنجی خواهد شد. علاوه بر این، قابل توجه است که تنها یکی از مقالات با پیشنهادها سطح معماری، اعتبارسنجی شده است، در حالی که بقیه در سطح نظری و مفهومی باقی مانده‌اند.

کمی و همکارانش در مورد امکان استقرار به عنوان یک برنامه کاربردی که خدماتی ارائه می‌دهد، بحث می‌کنند [۱۶]. این احتمال می‌تواند با توجه به زمان راه‌اندازی و پتانسیل تبدیل سرویس به یک پلتفرم MEC همزمان با تثبیت فناوری و مدل‌های کسب و کار، یک مزیت تجاری محسوب شود. این امر، پیشنهاد ارائه شده را تقویت می‌کند و یک سناریوی دانشگاهی با رویکردی متفاوت از سایرین ارائه می‌دهد. تا آنجا که ما می‌دانیم، هیچ راه حل متن‌بازی در ادبیات برای مقایسه پیاده‌سازی وجود ندارد.

۴. یک سرویس جدید پیشنهادی

مزایای MEC و چگونگی تأثیر مثبت آنها بر شبکه‌های 5G قبلاً ارائه شده است. با این حال، برای امکان پذیرکردن ترکیب این دو فناوری، لازم است مؤلفه‌ای توسعه یابد که امکان ارتباط را فراهم کند و از استانداردهای تعیین شده پیروی کند. یکی از احتمالات، یک سرویس ارتباطی است که از طریق یک برنامه یا به عنوان بخشی از سرویس یک پلتفرم MEC پیاده‌سازی می‌شود و این ارتباط را با استفاده از یک برنامه مشخص می‌کند و روند راه‌اندازی و استقرار را سرعت می‌بخشد [۱۶]. امکان دیگر، استقرار سرویس به عنوان بخشی از پلتفرم MEC است. با این حال، ادغام کل ساختار سرویس در پلتفرم MEC امری بدیهی است. بنابراین، هدف این کار مشخص کردن یک API ارتباطی است که یک سرویس ارتباطی مستقر به عنوان یک برنامه را فراهم می‌کند.

این سرویس باید به برنامه‌های UE اجازه دهد تا با برنامه‌های سرور مربوطه که به صورت داخلی روی پلتفرم MEC ایزوله شده‌اند، تعامل داشته باشند. بنابراین، سرویس باید اطلاعات را دریافت کند.

پیشنهاد ادغام 5G-MEC

ادغام از طریق سرویس

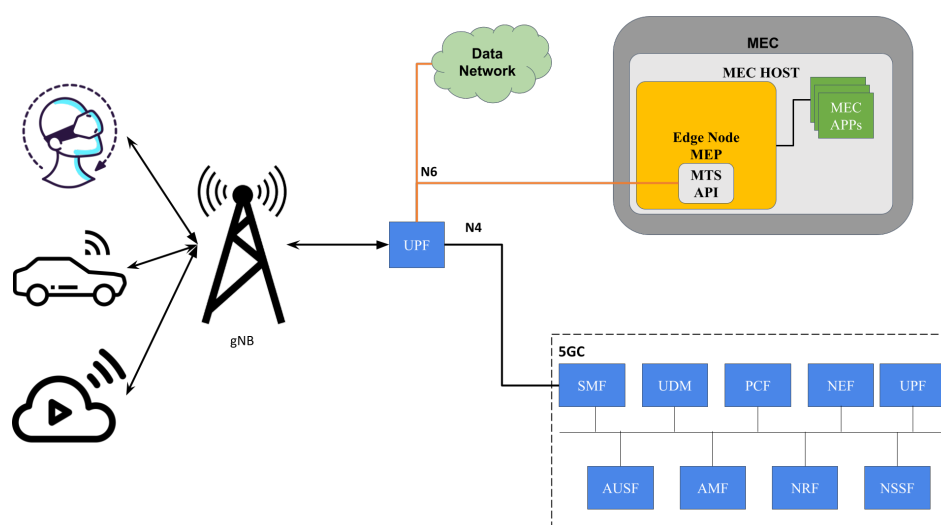
ادغام از طریق معماری جدید

اعتبارسنجی پروپوزال

اعتبارسنجی 5G SA

درمورد مقصد و محتوایی که قرار است ارسال شود، اطلاعات کسب می کند و پس از تأیید وجود آن، آن را منتقل می کند. سپس سرویس باید منتظر پاسخ بماند و آن را به درخواست کننده بازگرداند. این جریان در هر دو جهت تکرار می شود. اطلاعات مربوط به مقصد باید در بدنه درخواست ارسال شود تا سرویس بتواند آن را پردازش کند و نحوه انجام این مسیریابی را درک کند. سطحی از امنیت با استفاده از توکن ها برای دسترسی به سرویس پیشنهادی پیاده سازی می شود. SR این توکن را تولید می کند. در ابتدا، این کار با هدف انتقال فایل های رسانه ای انجام نمی شود، که یکی از افزونه های احتمالی آینده است.

سرویس یکپارچه سازی، که به عنوان یک برنامه کاربردی مستقر شده است، روی MEC، به طور خاص روی مؤلفه MEP اجرا خواهد شد. MEP یک مؤلفه داخلی MEC HOST است که برنامه های کاربردی MEC را نیز به عنوان بخشی از دامنه خود دارد، بنابراین اینها اجزای MEC تحت پوشش این کار هستند. سرویس ارتباطی که توسط MEP اجرا می شود، ارتباط بین برنامه های کاربردی 5G و MEC را از طریق 3GPP فراهم می کند. رابط ۶. سیگنالینگ که بین UE و 5GC انجام می شود، خارج از محدوده این کار است. این اجزا را می توان در معماری پیشنهادی نشان داده شده در شکل مشاهده کرد.^۲



شکل ۲. معماری کلی پروپوزال

شکل ۲ همچنین ساختار 5GC را نشان می دهد که SMF آن از طریق ... به UPF متصل است. رابط ۴. می توان مشاهده کرد که هسته دارای دو UPF و تنها یک SMF است که توسط مدل معماری SBA امکان پذیر شده است. به منظور جلوگیری از انتقال سیاست های بالادستی N6 به UPF، که به طور مداوم شامل 5GS می شود، یک گره صفحه داده (D-Plane) با اتصال سست با یک یا چند UPF فرض می شود [۳۴]. تصویر، رابط رادیویی gNB و نمایش برنامه هایی که با MEC ارتباط برقرار می کنند را نشان می دهد. لازم به ذکر است که این مطالعه، ارتباط داخلی هسته بین NF ها و رابط رادیویی را در نظر نمی گیرد.

پیاده سازی این سرویس شامل دو عملکرد اصلی خواهد بود: *makeRequest* و *makeRequest* اولین مورد از این موارد است پست داده تابع. وظیفه اصلی آن مسیریابی بسته ها خواهد بود، یعنی وقتی یک بسته می رسد، به اطلاعات موجود در بدنه آن نگاه می کند، مقصد آن اطلاعات و اینکه کدام روش HTTP استفاده خواهد شد را شناسایی می کند. مدل داده ای که برای این تابع مشخص شده است شامل دریافت آدرس IP سرویس مقصد، روش HTTP مورد استفاده و اطلاعاتی که باید ارسال شود، می باشد.

پس از دریافت اطلاعات فوق، *makeRequest* تابع فراخوانی می شود. این تابع وظیفه دارد داده ها را به مقصدهای خود منتقل کند. با اطلاعات دریافتی قبلی، درخواست جدیدی ارسال می شود، اما این درخواست به مقصد نهایی آن اطلاعات ارسال می شود و منتظر پاسخ می ماند. پاسخ به ... ارسال می شود. پست داده و آن را به UE منتقل می کند. علاوه بر این دو روش، این سرویس شامل یک روش سوم به نام میک رجیستری برای ثبت در SR. این تابع شامل تمام جزئیات سرویس، مانند IP، پورت و نقاط پایانی است. این اطلاعات برای ثبت به SR ارسال می شود و به برنامه های علاقه مند اجازه می دهد تا این جزئیات را بررسی و دریافت کنند.

برای اینکه کل این جریان با سطح امنیتی بالاتری کار کند، یک سرویس رجیستری به نام رجیستری سرویس پیاده سازی خواهد شد. این رجیستری بر روی برنامه ها و سرویس هایی در پلتفرم MEC تمرکز دارد که مایل به دسترسی داخلی یا خارجی از طریق API یکپارچه سازی هستند. برای این منظور، یک برنامه/سرویس باید IP، پورت و نقاط انتهایی خود را با روش های مربوطه ثبت کند. سپس برنامه های علاقه مند می توانند این اطلاعات را بررسی کنند. یک برنامه کلاینت در UE قادر خواهد بود بررسی کند که آیا سرور مربوطه اش در دسترس است یا خیر و در صورت وجود، تمام اطلاعات برای ارتباط منتقل می شود.

در این کار، این سرویس به عنوان یک برنامه پیاده سازی خواهد شد. با این حال، این سرویس می تواند به دلخواه در پلتفرم MEC گنجانده شود. در این سناریو، سرویس از طریق MEP نیز قابل دسترسی خواهد بود و از طریق رابط N6 ارتباط برقرار می کند. این برنامه به عنوان یک API RESTful پیاده سازی خواهد شد. با پیاده سازی آن به عنوان یک برنامه، نیازی به هیچ ارتباطی با CP اصلی نیست. بنابراین، تمام ترافیک داده ها از طریق DP و UPF انجام می شود. ارتباطات از طریق درخواست های HTTP انجام می شود.

علاوه بر معماری مرجع MEC، اسناد فنی ETSI به دو رابط برنامه نویسی کاربردی (API) نیز می پردازند: هدایت ترافیک با دسترسی چندگانه (MTS) و مدیریت پهنای باند (BWM) [۱۳]. مسئول مدیریت ترافیک، مسیریابی آن، تقسیم آن و تکثیر آن در شبکه های دسترسی مختلف برای برآورده کردن نیازهای شبکه درخواستی برنامه ها است MTS API، است که تخصیص پهنای باند بین برنامه ها و همچنین اولویت بندی ترافیک خاص را مدیریت می کند. از سوی دیگر (API) رابط برنامه نویسی کاربردی BWM [۱۴] توجه به اینکه اهداف سرویس مورد بحث در این کار و API مربوط به MTS تا حدی با هم سازگار هستند، پیشنهاد می شود که API مربوط به MTS گسترش یابد تا یک سرویس هدایت ترافیک برای شبکه داده خارج از MEC ارائه دهد.

۴.۱ پیاده سازی

پیاده سازی API پیشنهادی از زبان پایتون مرتبط با چارچوب Flask استفاده کرد [۳۵] این میکروفریم ورک به دلیل سادگی، کارایی و استحکامش به طور گسترده برای توسعه برنامه های وب استفاده می شود. فلاسک یک تابع را با یک نقطه پایانی مرتبط می کند که از طریق آن اطلاعات رد و بدل می شود.

توابع پیاده سازی شده به یک نقطه پایانی متصل هستند که به درخواست های HTTP پاسخ می دهد. تابع اصلی فقط درخواست ها را از طریق پست متد. در نتیجه، درخواست هایی که از این متد استفاده نمی کنند، نادیده گرفته می شوند. پس از دریافت درخواست، API تابع () را فراخوانی می کند. پست داده روش. این رویه بررسی می کند که آیا حداقل محتوا برای انتقال داده ها مورد نیاز است یا خیر. این بررسی در محتوای پیام، آدرس IP مقصد و روش HTTP مورد استفاده را جستجو می کند. محتوای پیام یک اعتبارسنجی ساده انجام می دهد تا در صورت وجود محتوا، به عنوان پارامتر در ... استفاده شود. `makeRequest` تابع. اگر هریک از این اطلاعات وجود نداشته باشد، یک پیام خطا با کد ۴۰۴ با پیام «سرویس IP و روش درخواست شده» ارسال می شود. تمام پیام ها برای داده های اولیه لازم بررسی می شوند، بنابراین، اگر چندین پیام فاقد داده باشند، چندین کد خطا برگردانده می شوند. هیچ اقدام خاصی لازم نیست زیرا در فرآیند ارتباط اختلالی ایجاد نمی کند.

برای اینکه اطلاعات به گیرنده اش منتقل شود، API فراخوانی می کند `makeRequest` روش. اولین بررسی روی روش HTTP مورد استفاده خواهد بود. با استفاده از پست یا `فرار دادن` نشان دهنده تبادل پیام است، بنابراین داده ها باید به متد ارسال شوند. در مورد بقیه، هیچ اطلاعاتی به جز اطلاعات اجباری ذکر شده در بالا مورد نیاز نیست. پس از اجرای درخواست، پیام پاسخ به صورت معکوس ارسال می شود، یعنی به ... می رسد. `makeRequest`، بازگردانده می شود به پست داده و در نهایت به مشتری، یعنی مقصد نهایی خود، می رسد.

لازم به ذکر است که برای این کار، سایر متدهای MTS API در نظر گرفته نشده اند. دلیل این امر این است که این متدها برای هدف پیشنهادی ضروری نیستند. متدها و نقاط پایانی مربوطه که در این API پیاده سازی شده اند، محافظت می شوند، بنابراین، برای اینکه هر برنامه/سرویس بتواند از آنها استفاده کند، باید یک توکن JWT داشته باشد.

ما حداقل موارد لازم برای برآورده کردن الزامات توسط رجیستری سرویس را پیاده سازی کرده ایم. چند عملکرد پیاده سازی شده اند. اولین مورد، مدیریت داده های رجیستری تابعی که اطلاعات را از برنامه ها و سرویس هایی که مایل به ثبت نام هستند دریافت می کند. پس از تأیید حداقل محتوا برای ثبت نام، دسته پست تابع است

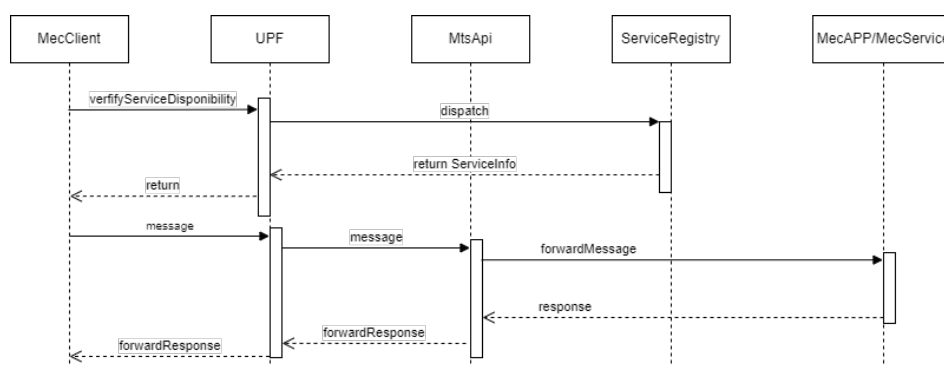
فراخوانی می شود که اطلاعات را در پایگاه داده ذخیره می کند. در نهایت، یک توکن برای این برنامه/سرویس با استفاده از کتابخانه JWT ایجاد می شود. برنامه دستگاه موظف است توکن دسترسی را با هر درخواست ارائه دهد تا بتواند مجوز خود را برای دسترسی به منبع با استفاده از روش خاص فراخوانی شده اعمال کند [۳۶].

handleSpecficDataThe این تابع همچنین در رجیستری سرویس گنجانده شده است. این تابع برای آسان تر کردن تغییر داده ها در پایگاه داده و بازیابی اطلاعات طراحی شده است. متدهای PUT و DELETE به کلاینت اجازه می دهند رکوردها را تغییر دهد. با متد GET، کلاینت می تواند داده های ذخیره شده در پایگاه داده را درخواست کند. در این سناریو، UE از طریق متد GET اطلاعات را درخواست می کند. جمع آوری اطلاعات از همان روشی پیروی می کند که قبلاً یک توکن در اختیار کاربر قرار داده است. این توکن برای استفاده از سرویس یکپارچه مورد نیاز است. دسته بندی، حذف دسته، و همدل گت توابع مشابه توابع ذکر شده در بالا هستند.

۲.۲ رابط برنامه نویسی کاربردی MTS

سیستم پیشنهادی در این مطالعه که با استفاده از MTS API پیاده سازی شده است، دارای یک نقطه دسترسی است که تبادل داده ها بین دو طرف ذینفع را تسهیل می کند. این سرویس یک درخواست POST را از طریق پروتکل HTTP دریافت می کند. درخواست باید شامل سه عنصر باشد: (۱) مقصدی که داده ها باید به آن ارسال شوند، (۲) روش دسترسی به آن مقصد، و (۳) اطلاعاتی که فرستنده مایل به ارسال آن است. رعایت قالب پیش فرض مدل داده بسیار مهم است، زیرا API داده های موجود در بدنه درخواست را با فرمت JSON تفسیر می کند و از کلیدهای مربوطه برای شناسایی محتوا استفاده می کند.

پس از دریافت داده ها، پست داده رویه فعال می شود. این تابع وظیفه دارد مقصد کلاینت نهایی و روش مورد استفاده در پروتکل HTTP را تشخیص دهد. این به دلیل نیاز به ایجاد یک درخواست جدید برای ارسال اطلاعات است. *makeRequest* متد برای اجرای این درخواست جدید فعال می شود که به طور جداگانه آدرس IP مقصد و داده هایی که باید منتقل شوند را به عنوان آرگومان دریافت می کند. پس از تکمیل این درخواست جدید، API پاسخ ارائه شده توسط سرور را دریافت کرده و این پاسخ را به کلاینت ارسال می کند. این زنجیره اقدامات را می توان در شکل مشاهده کرد. ۳.



شکل ۳. عملکرد API پیشنهادی.

این قابلیت از طریق یک پورت خارجی به نام NodePort با استفاده از سرویس Kube-proxy این قابلیت از طریق یک پورت خارجی به نام NodePort با استفاده از سرویس Kube-proxy قابل دسترسی خواهد بود. در این زمینه، Kube-proxy با استفاده از NAT یک پورت متصل به سرویس ایجاد می کند [۳۷] همانطور که در شکل دیده می شود انتظار می رود که کلاینت، موجود بودن سرویس مورد نظر را در رجیستری سرویس بررسی کند و در صورت موجود بودن، تمام اطلاعات مربوطه را دریافت کند. در نتیجه، فرمت داده ای که MTS API باید شامل آدرس کامل، یعنی IP مقصد، پورت و نقطه پایانی باشد.

وظیفه رجیستری سرویس شامل دریافت اطلاعات مربوط به برنامه ها و سرویس های موجود در سرور مورد نظر و فعال کردن برنامه های کلاینت علاقه مند برای دریافت این جزئیات، امکان دسترسی به این برنامه ها یا امکان هدایت مناسب داده های آنها است. برای انجام این عملکرد، SR از پایگاه داده MongoDB NoSQL استفاده می کند [۳۸].

برای اینکه یک برنامه MEC برای علاقه مندان قابل دسترس باشد، برنامه باید فرآیند ثبت نام را با SR انجام دهد. SR منتظر می ماند تا برنامه داده هایی مانند آدرس IP، شماره پورت و نقاط پایانی ارائه شده را ارسال کند. برنامه باید

حداقل یک نقطه پایانی ایجاد کنید. به محض رسیدن اطلاعات، SR اعتبار این داده ها را بررسی کرده و آنها را در پایگاه داده ذخیره می کند.

رجیستری سرویس، سرویسی است که از خارج توسط کلاینت برای بررسی وجود سرویس های ثبت شده قابل دسترسی است. کلاینت از یک نقطه دسترسی برای جستجو استفاده می کند و یک JSON حاوی اطلاعات سرویس و یک توکن احراز هویت تولید شده با کتابخانه JWT پایتون را با استفاده از یک کلید خاص در کد دریافت می کند.

۵. ارزیابی عملکرد

هدف این بخش، اعتبارسنجی طرح پیشنهادی با بحث در مورد موارد استفاده ای است که از MEC بهره مندمی شوند، جزئیات محیط اعتبارسنجی را شرح می دهد و نتایج را ارائه می دهد. این نتایج با ویژگی های برنامه هایی که از MEC بهره مند می شوند مقایسه می شوند تا قابلیت اجرایی راه حل مورد بحث قرار گیرد.

کارپیشنهادی، نتایج خدمات را با استفاده از شاخص های کلیدی عملکرد (KPI) شرح داده شده در مقالات ارزیابی خواهد کرد. سناریوی ارزیابی شامل موارد استفاده از سلامت الکترونیک و اینترنت اشیا خواهد بود. برای حوزه سلامت، سناریوهایی مانند جراحی از راه دور، مشاوره از راه دور، پشتیبانی امدادگر، رویدادهای حیاتی سلامت، علائم حیاتی و برجسب های مکان. با استفاده از حداقل KPI های مورد نیاز برای هر کاربرد، بر اساس مطالعات قبلی، مشاهده خواهند شد [۴۰، ۳۹]. برای سناریوهای اینترنت اشیا، ویژگی های خانه های هوشمند، اینترنت اشیا پوشیدنی (WIoT) و مزارع با استفاده از اطلاعات شرح داده شده در [] تجزیه و تحلیل خواهند شد. ۴۱ شاخص های کلیدی عملکرد (KPI) که برای مقایسه در نظر گرفته می شوند، عمدتاً مربوط به تأخیر خواهند بود، اگرچه در صورت لزوم می توان از اطلاعات دیگر نیز استفاده کرد. شاخص های کلیدی عملکرد در جدول ارائه شده اند. ۲.

جدول ۲: شاخص های کلیدی عملکرد (KPI) مورد استفاده برای مقایسه

کاربرد	تأخیر
خانه هوشمند	امیلی ثانیه تا ۱۰۰۰
جراحی از راه دور	۲۰۰ امیلی ثانیه
مشاوره پزشکی از راه دور	امیلی ثانیه تا ۱۰۰
پشتیبانی پیراپزشکی	۲۰۰ امیلی ثانیه
رویداد بحرانی سلامت	۲۰۰ امیلی ثانیه
مزرعه هوشمند	~ ساعت
برجسب های علائم حیاتی	۱۰۰۰ امیلی ثانیه
برجسب های قابل مکان یابی	۱۰۰۰ امیلی ثانیه

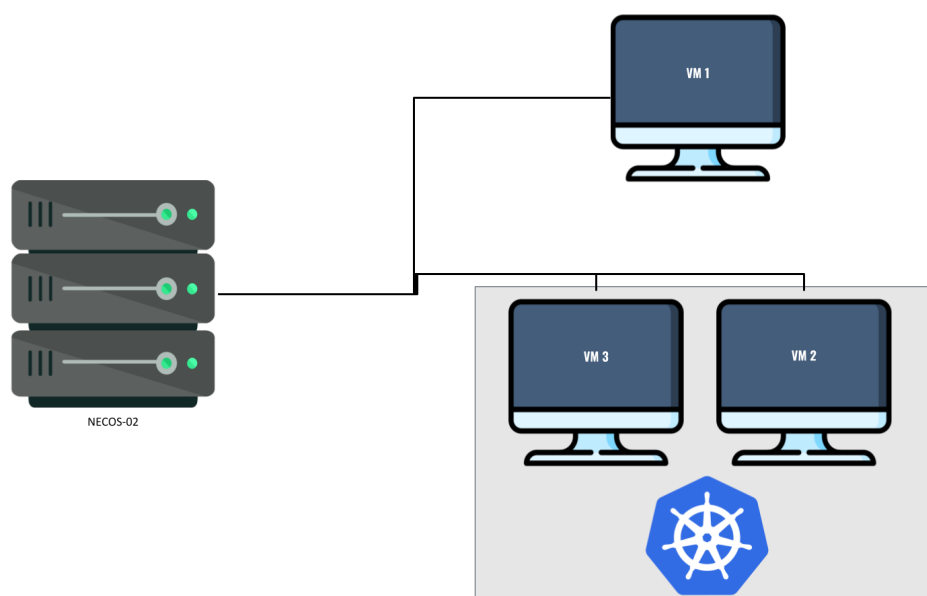
۵.۱ محیط زیست

یک محیط اعتبارسنجی برای این پیشنهاد طراحی شد و به دنبال یک چارچوب MEC و یک 5GC برای ارزیابی و اعتبارسنجی محصول نهایی بود. در ابتدا برخی از پلتفرم های MEC در نظر گرفته شدند، اما به دلیل عدم پشتیبانی از سوی این راه حل های دیگر، یک راه حل کانتینری با استفاده از Kubernetes انتخاب شد. 5GC انتخاب شده free5GC بود که برای تسهیل اجرای توابع شبکه، کانتینری شده بود. استقرارها روی ماشین های مجازی میزبانی شده روی یک سرور اختصاصی انجام شد.

کلاستر Kubernetes که برای شبیه سازی پلتفرم MEC پیشنهاد شده است، شامل سه ماشین مجازی است، یکی برای استقرار free5GC و دو تای دیگر برای پلتفرم MEC. همه ماشین های مجازی روی سروری به نام NECOS-02 اجرا می شوند. VM1 که برای استقرار free5GC استفاده می شود، دارای 8 گیگابایت رم، 100 گیگابایت دیسک، 4 پردازنده مجازی و سیستم عامل Ubuntu Live Server 18.04 LTS است. VM های 2 و 3 هر کدام دارای 8 گیگابایت رم، 120 گیگابایت دیسک و 4 پردازنده مجازی با سیستم عامل Live Server 18.04 LTS Ubuntu هستند. شکل ۴ ساختار اعتبارسنجی را نشان می دهد. معماری free5GC که برای اعتبارسنجی استفاده می شود شامل سه UPF است: UPF شاخه ای (UPF-)، (UPF-M) MEC UPF و UPF اینترنتی (UPF-I). B-UPF به عنوان واسطه ای بین اتصال کاربر و شبکه مقصد عمل می کند و به هیچ برشی وابسته نیست.

برای اعتبارسنجی این پیشنهاد، یک برنامه MEC برای شبیه سازی یک محیط سرتاسری توسعه داده شد که در آن ترافیک بین UE و برنامه از سرویس یکپارچه سازی استفاده می کند. علاوه بر این، یک SR ایجاد شد تا توکن های ثبت نام را برای برنامه هایی که مایل به استفاده از خدمات MTS API هستند، فراهم کند. پس از توسعه برنامه ها و خدمات، آنها

در یک محیط عملیاتی مستقر شدند و از سرور Waitress برای اجرای برنامه های پایتون استفاده کردند. استقرارها هماهنگ شدند و ابتدا SR اجرا شد تا امکان ثبت برنامه ها فراهم شود. مرحله اعتبارسنجی به سه مرحله تقسیم شد: مرحله اول، اجرای صحیح محیط آزمایش را تضمین می کرد، مرحله دوم شامل ثبت سرویس هادر SR بود و مرحله سوم شامل اجرای آزمایش ها و جمع آوری و ارزیابی نتایج بود.



شکل ۴. ساختار ماشین مجازی مورد استفاده در اعتبارسنجی.

۵.۲ معیارهای ارزیابی

این پیشنهاد با یک برنامه ساده که شاخص توده بدنی (BMI) را با استفاده از درخواست های POST محاسبه می کند، اعتبارسنجی خواهد شد. لازم به ذکر است که این درخواست می تواند به هر برنامه ای که در خوشه در حال اجرا است و به طور مناسب در SR ثبت شده است، ارسال شود. بنابراین، استفاده از این برنامه محدود به تأیید قابلیت اجرای API پیشنهادی است. برای انجام این کار، سه سناریو با تعداد کاربران مختلف (۱، ۱۰، ۵۰ و ...) اجرا خواهد شد. ۱۰۰، شبیه سازی توانایی پاسخگویی به درخواست های همزمان. هر سناریو در زمان های اجرای مختلف ۵، ۱۰، ۳۰ و ۶۰ ثانیه اجرا خواهد شد.

این تغییر با هدف ارزیابی تغییرات عملکرد در طول دوره های پیوسته انجام می شود. ابزار LOCUST درخواست های HTTP را ایجاد کرده و میانگین زمان پاسخ و میانگین تعداد درخواست ها را به دست می آورد [۴۲].

علاوه بر این، سرور عملیاتی با چهار و هشت رشته برای ارزیابی عملکرد آزمایش خواهد شد. مجموعه های آزمایشی ده بار اجرا می شوند تا نتایج قابل اعتمادی به دست آید و یک بازه اطمینان ۹۵٪ برای ارزیابی تغییرپذیری نتایج محاسبه می شود. بازه اطمینان (سی) با استفاده از معادله زیر محاسبه می شود:

$$سی = \frac{Z}{\sqrt{n}} \cdot \sigma$$

که Z یکس نشان دهنده میانگین زمان پاسخ نمونه به دست آمده در ۱۰ اجرا است. σ نشان دهنده انحراف معیار زمان های پاسخ است، در حالی که n حجم نمونه رانشان می دهد. \pm فواصل نتایج بالا و پایین را نشان می دهد.

آزمون ارتباط سرتاسری

هدف این آزمایش نشان دادن امکان برقراری ارتباط سرتاسری است. برای انجام این کار، درخواست هایی به برنامه ای که با استفاده از سرویس یکپارچه سازی توسعه داده شده است، ارسال خواهد شد. جنبه های زیر مورد تجزیه و تحلیل قرار خواهند گرفت: (۱) پاسخ به درخواست و اینکه آیا با آنچه انتظار می رفت مطابقت دارد یا خیر؛ (۲) زمان صرف شده برای بررسی و ارسال اولین پاسخ؛

و (iii) زمان پاسخ درخواست ها. علاوه بر این، رابط UPF با برنامه برای ثبت بسته برای تجزیه و تحلیل بعدی نظارت خواهد شد. برای موارد 1 و 4، فقط یک درخواست انجام خواهد شد، با توجه به اینکه اطلاعات مشاهده شده تغییر نخواهند کرد. با این حال، برای سایر موارد 30 اجرا انجام خواهد شد تا میانگین زمان به دست آید. فواصل اطمینان نیز برای زمان های مورد بحث محاسبه خواهد شد. برای این آزمایش، از هیچ ابزار آزمایش خاصی استفاده نخواهد شد. اندازه گیری درخواست و زمان با استفاده از برنامه های بومی اوبونتو انجام خواهد شد.

۵.۳. آزمون اعتبارسنجی سرتاسری

هدف از اعتبارسنجی سرتاسری، بررسی این موضوع است که آیا ارتباط موفقیت آمیزی بین UE و App-MEC وجود داشته است یا خیر، و ترافیک از UPF و MTS-API عبور می کند. نقطه کانونی تحلیل، تبادل پیام های بین UPF و API بود. برای این منظور، در طول ارتباط، بسته های رد و بدل شده ضبط شدند و امکان اعتبارسنجی مسیر طی شده توسط هر درخواست فراهم شد.

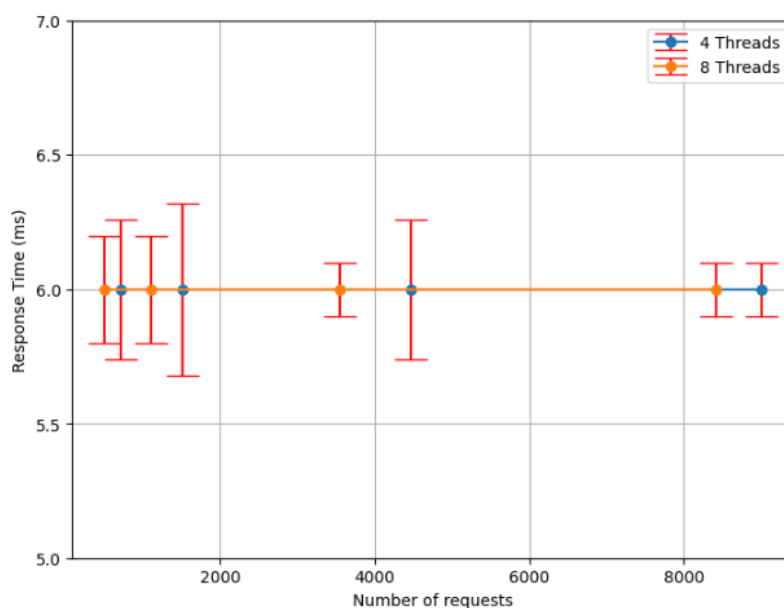
این تحلیل همچنین میانگین زمان پاسخگویی برای درخواست ها را ۳۱ میلی ثانیه با انحراف معیار ۱.۷۱ نشان داد. این انحراف معیار نشان می دهد که زمان پاسخگویی در ۳۰ اجرا، تغییر اندکی داشته و نزدیک به میانگین بوده است. هنگام تأیید وجود سرویس و دریافت توکن از UE، زمان پاسخگویی ۲۶ میلی ثانیه با انحراف معیار بالاتر ۵.۲۱ است که نشان دهنده تغییر قابل توجه تر در زمان های پاسخگویی است. با در نظر گرفتن کل فرآیند، میانگین زمان ۵۷ میلی ثانیه با انحراف معیار ۵.۶۳ به دلیل انحراف معیار بررسی وجود سرویس است.

این نتیجه نشان می دهد که این راه حل برای موارد استفاده از سلامت الکترونیک قابل اجرا است. طبق [۴۰]، که KPI ها را برای سناریوهای مراقبت های بهداشتی ارائه می دهد، این راه حل برای کاربردهایی مانند پشتیبانی امدادی و رویدادهای بحرانی (که در مقاله مشخص نشده است) مناسب خواهد بود.

۵.۴. نتایج ارزیابی API

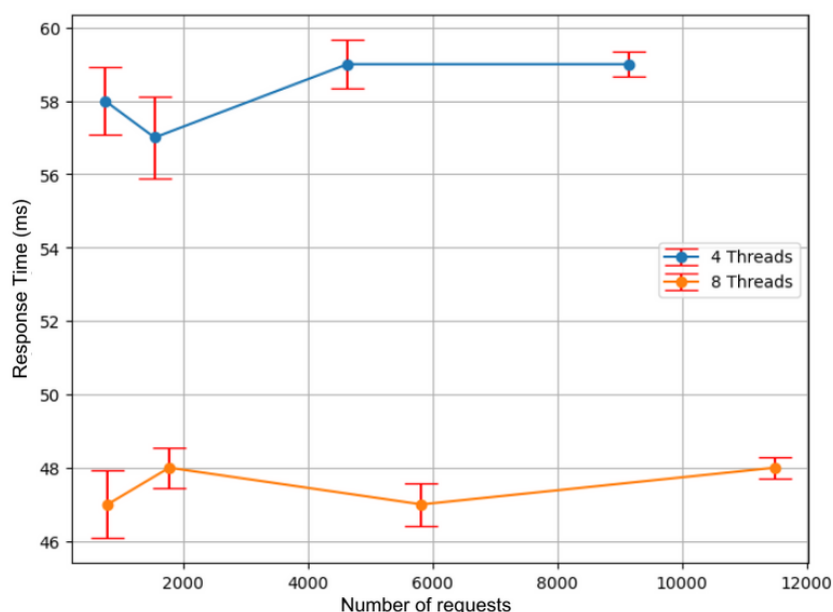
نتایج ارائه شده بر اساس معیارها و موارد استفاده ارائه شده است. تغییر در تعداد کاربران به ما این امکان را می دهد که رفتار سرویس را در سناریوهایی با رقابت برای منابع یکسان ارزیابی کنیم. آزمایش های ارائه شده در اینجا تجربی هستند. در سناریوهای واقعی، اعداد ممکن است متفاوت باشند.

شکل ۵ نتایج را برای یک کاربر نشان می دهد. همانطور که انتظار می رفت، زمان پاسخ برای چهار و هشت نخ مشابه است. می توان مشاهده کرد که هر چه زمان اجرا طولانی تر باشد، انحراف معیار کوچکتر است و در 30 ثانیه به 0 می رسد و بنابراین فاصله اطمینان کوچکتری را ارائه می دهد. زمان پاسخ بدست آمده الزامات [۴۱] را برآورده می کند. برای سناریوهای خانه هوشمند و حتی بازی ها، که به تأخیر ۱۰ میلی ثانیه یا کمترین نیاز دارند.



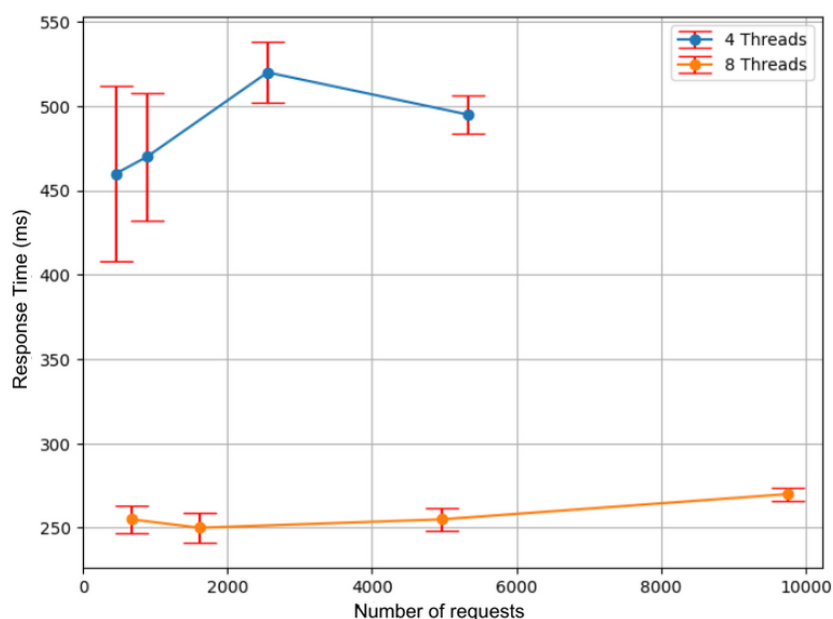
شکل ۵. عملکرد با ۱ کاربر.

وقتی سناریویی را با ده کاربر اجرا می کنیم (شکل ۶)، زمان پاسخ افزایش می یابد و با چهار رشته به ۵۸ میلی ثانیه و با هشت رشته به ۴۷ میلی ثانیه می رسد. دلیل این امر این است که برخلاف سناریوی قبلی، رقابت برای همان منبع (استفاده از خدمات) وجود دارد. همانند سناریوی قبلی، سناریوهای گسترده تر دارای فواصل اطمینان کوچکتر با تغییرات زمانی جزئی هستند. این نتیجه، این راه حل را در سناریوهایی با برنامه های پشتیبانی امدادی یا رویدادهای بحرانی سلامت، قابل اجرا می کند [۴۰].

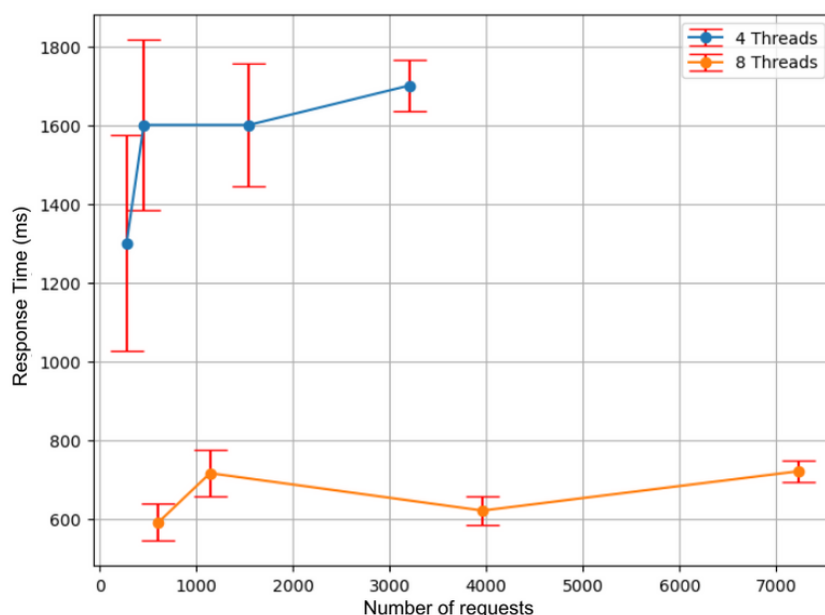


شکل ۶. عملکرد با ۱۰ کاربر.

برای ۵۰ و ۱۰۰ کاربر (شکل ۷ و ۸)، تأخیر به طور قابل توجهی افزایش می یابد و تأخیرها به ترتیب با استفاده از چهار رشته به ۵۲۰ میلی ثانیه و ۱۷۰۰ میلی ثانیه می رسند. این مقادیر با افزایش قدرت پردازش به هشت رشته، با ۲۵۰ میلی ثانیه برای ۵۰ کاربر و ۵۹۰ میلی ثانیه برای ۱۰۰ کاربر، کاهش می یابند.



شکل ۷. عملکرد با ۵۰ کاربر.



شکل ۸. عملکرد با ۱۰۰ کاربر.

نتایج مربوط به ۵۰ کاربر، نشان دهنده ی قابلیت اجرای این راهکار برای سناریوهای کشاورزی هوشمند است، به عنوان مثال، با انتقال داده ها از حسگرها و برچسب های مکان، [۴۰، ۳۹] با ۱۰۰ کاربر، نتایج نشان می دهد که سناریوهایی مانند خانه هوشمند، برچسب های موقعیت مکانی و مشاوره پزشکی از راه دور، زمان پاسخگویی بسیار بالایی را می پذیرند. [۴۱، ۴۰].

نتایج نشان می دهد که راهکار مطابق انتظار عمل کرده است. زمان های نمایش داده شده در نمودارها، نشان دهنده ی قابلیت اجرایی راهکار در موارد استفاده ی مختلف ارایه شده در مقالات و این کار است. با این حال، با تکامل برنامه ها و شبکه، ممکن است موارد استفاده ی جدیدی ایجاد شود و تقاضاهای جدیدی مورد نیاز باشد. بنابراین، در درازمدت، لازم است قابلیت اجرایی این راهکار در سناریوها و نیازهایی که پیش خواهد آمد، بررسی شود.

۶. نتیجه گیری

ادبیات موجود به صورت محدود به ادغام بین شبکه های 5G و MEC می پردازد و عمدتاً بر معماری های مفهومی جدید تمرکز دارد. با این حال، شکاف هایی در رابطه با پیاده سازی و اعتبارسنجی این پیشنهادها در یک 5GC وجود دارد. از این رو، ما یک پیاده سازی به عنوان سرویس برای اتصال 5G و MEC پیشنهاد داده ایم. این سرویس، افزونه ای از API MTS تعریف شده توسط ETSI است که به دنبال سازگاری اهداف می باشد. اعتبارسنجی در یک محیط مجازی با هسته شبکه 5G، شبیه سازی gNB، UE، و یک خوشه Kubernetes به عنوان پلتفرم MEC انجام شده است.

نتایج اعتبارسنجی، توانایی سرویس پیشنهادی را در برقراری ارتباط بین UE و برنامه، از جمله ارزیابی عملکرد، به ویژه برای برنامه های URLLC نشان داد. راه حل پیشنهادی را می توان با سایر راه حل های موجود در مقالات مقایسه کرد و برای بهبود زمان پاسخ، با هدف دستیابی به زمان های پایین تر و پایدار، بهینه سازی نمود.

این کار با فعال کردن ادغام 5G-MEC از طریق سرویسی که به عنوان یک برنامه کاربردی مستقر شده است، به هدف کلی خود دست یافت. این راه حل نتایج رضایت بخشی را در سناریوهای ارزیابی شده نشان داد و مبنایی برای مطالعات و بهینه سازی های آینده فراهم کرد. برای کارهای آینده، ما در حال کار بر روی اعتبارسنجی سرویس، از جمله محیط واقعی O-RAN و برنامه چند مستاجر واقعی هستیم.

مشارکت های نویسنده: مفهوم سازی، LF، RX، AO-J؛ روش شناسی، AO-J، RX، LF و RX؛ نرم افزار، RX؛ اعتبارسنجی، RSS، LF، RX، AO-J؛ تحقیق، RX؛ منابع، RX؛ نگارش - تهیه پیش نویس اصلی، RX؛ نگارش - بررسی و ویرایش، LF، WM، RSS، RX، AO-J؛ مصورسازی، LF، RX، AO-J؛ نظارت، AO-J، LF؛ مدیریت پروژه، MR، AO-J، WM؛ تأمین بودجه، MR، AO-J، WM. همه نویسندگان نسخه منتشر شده مقاله را خوانده و با آن موافقت کرده اند.

تأمین مالی: این کار تا حدودی توسط Fraunhofer Portugal AICOS و تا حدودی توسط (FAPESP) Foundation Smart 5GC And MultiRAn Integration (SAMURAI) از طریق پروژه MCTIC/CGI.br/São Paulo Research تحت کمک هزینه 2020/05127-2 پشتیبانی شده است.

بیانیه دسترسی به داده ها: مجموعه داده ها بنا به درخواست نویسندگان در دسترس است.

تضاد منافع: نویسندگان هیچ گونه تضاد منافی را اعلام نمی کنند.

اختصارات

در این دست نوشته از اختصارات زیر استفاده شده است:	
3GPP	پروژه مشارکت نسل سوم سیستم 5G
5GS	ایام اف
یو-کی	رابط برنامه نویسی کاربردی
یو-یوپی اف	شاخص توده بدنی (BMI)
یو-یوپی ام	یو-یوپی ام
داسمو	سیس
دی ان	شبکه داده مدیریت خودکار برش توزیع شده
دی پی	صفحه داده
ای پی	اگر ایاپیت
ایام پی پی	هسته بسته تکامل یافته پهنای باند
طرح و برنامه ریزی	موبایل پیشرفته
جیان پی	رادیو جدید 5G
اچ پی اس	سرور مشترکین خانگی
اچ تی پی	پروتکل انتقال ابرمتن یکپارچه
مرکز تحقیقات نزدیک به مرکز تحقیقات	نزدیک به RT RIC
آی-یوپی اف	یوپی اف اینترنتی
آی ای پی	اینترنت اشیا با دسترسی یکپارچه
اینترنت اشیا	Backhaul
جی سون	نشانه گذاری شیء جاوا اسکریپت در
جی-دیلو پی	JSON Web Token
شاخص کلیدی عملکرد (KPI)	شاخص عملکرد کلیدی UPF
M-UPF	MEC
ام پی پی	پهنای باند موبایل
ام پی سی	کاربرد MEC محاسبات لبه ای با
برنامه MEC	دسترسی چندگانه
میو	پلتفرم MEC هماهنگ کننده لبه با
نماینده پارلمان اروپا	دسترسی چندگانه
ام پی پی ام	مدیر پلتفرم MEC
مایمو	مدیریت تحرک چند ورودی و چند خروجی
ام ام ای	موجودیت ارتباطات نوع ماشین عظیم هدایت
ام ام تی سی	ترافیک چند دسترسی
ام پی اس	عملکرد نوردهی شبکه کنترل کننده هوشمند RAN
نزدیک به RT RIC	تقریباً بلادرنگ
ان ای اف	مجازی سازی عملکرد شبکه، شبکه های
NFV	خصوصی
NPNها	رادیو جدید
نورت	برش شبکه
ان اس	غیر مستقل
آژانس امنیت ملی	رابط کاربری OpenAir
OAI	کیفیت خدمات
کیفیت سرویس (QoS)	انتقال حالت نمایندگی مستقل
استراحت	
اس ای	

معماری مبتنی بر سرویس رابط
مبتنی بر سرویس شبکه های
تعریف شده نرم افزاری تابع مدیریت
جلسه شبکه خودسازمانده رجیستری
سرویس

تجهیزات کاربر
کیفیت فوق العاده بالا
تابع صفحه کاربر
ارتباطات فوق العاده مطمئن با تأخیر کم، ارتباط خودرو
باهم چیز
مدیر زیرساخت مجازی سازی ماشین مجازی

توابع شبکه مجازی اینترنت اشیا
نوشیدنی

۱۸. مالکی، ای. اف؛ ما، دبلیو. مشایخی، ال. لا روش، اچ. انتخاب مؤلفه 5G آگاه از QoS برای تحویل محتوا در محاسبات لبه ای با دسترسی چندگانه. در مجموعه مقالات چهاردهمین کنفرانس بین المللی IEEE/ACM در مورد خدمات رفاهی و محاسبات ابری، لستر، انگلستان، ۶ تا ۹ دسامبر ۲۰۲۱؛ صفحات ۱ تا ۱۰.

۱۹. ایوای، ت.؛ ناکائو، آ. رفع ابهام از افسانه های MEC: بازاندیشی و بررسی مزایای محاسبات لبه ای با دسترسی چندگانه/موبایل. در مجموعه مقالات هفتمین کنفرانس بین المللی IEEE 2018 در مورد شبکه ابری (CloudNet)، IEEE، توکیو، ژاپن، ۲۲ تا ۲۴ اکتبر ۲۰۱۸؛ صفحات ۱ تا ۴.
- پینل دی دادوس. 2021. در دسترس آنلاین. Agência Nacional de Telecomunicações. <https://paineis/ acessos/telefoniamovel20>. (دسترسی در ۷ مه ۲۰۲۱).
۲۱. اریکسون. گزارش تحرک اریکسون ۲۰۲۰. به صورت آنلاین در دسترس است: <https://www.ericsson.com/en/press-releases/2020/11/more-than-1-billion-people-will-have-access-to-5g-coverage-by-the-end-of-2020> (دسترسی در ۲۵ آوریل ۲۰۲۴).
۲۲. آمازون دریافت که هر ۱۰۰ میلی ثانیه تأخیر، ۱٪ از فروش آنها را کاهش می دهد. ۲۰۲۳. به صورت آنلاین در دسترس است: <https://www.gigaspace.com/blog/amazon-found-every-100ms-of-latency-cost-them-1-in-sales> (دسترسی در ۱۲ دسامبر ۲۰۲۳).
۲۳. کستینی، آ.؛ فرنگودیس، پنسیلوانیا، به سوی محاسبات لبه ای چند دسترس با قابلیت برش در نسل پنجم اینترنت همراه. شبکه IEEE ۲۰۲۰، ۳۴، ۱۰۵-۹۹. [کراس رف]
۲۴. ما، اچ.؛ لی، اس.؛ ژانگ، ای.؛ ال.وی، زی.؛ هو، جی.؛ وی، ایکس. 5G-V2X مبتنی بر MEC با کمک رانندگی خودران مشارکتی: طراحی نمونه اولیه سیستم، آزمایش های میدانی و ابزارهای بهینه سازی مبتنی بر هوش مصنوعی. دسترسی IEEE ۲۰۲۰، ۸۴، ۵۴۳۸-۵۴۳۰. [کراس رف]
۲۵. طرح 2021 my5G. my5G-Core. به صورت آنلاین در دسترس است: <https://github.com/my5G/my5G-core> (دسترسی در ۱ ژانویه ۲۰۲۴).
۲۶. مورایس، اف زد؛ د آلمیدا، جی ام اف؛ پینتو، ال.؛ کاردوسو، کی وی؛ کنتراس، ال ام؛ ریگی، آر دی آر؛ هر دو، سی بی پلیس آر ان: جایگذاری بهینه توابع شبکه مجازی در شبکه های دسترسی رادیویی فراتر از ۵ جی. IEEE Trans. Mob. Comput. ۲۰۲۳، ۲۲، ۵۴۳۴-۵۴۴۸. [کراس رف]
۲۷. شبکه، دسترسی رادیویی زمینی جهانی تکامل یافته، پروژه مشارکت نسل سوم؛ خدمات گروه مشخصات فنی و جنبه های سیستم؛ بهبودهای سرویس رادیویی بسته ای عمومی (gprs) برای دسترسی به شبکه دسترسی رادیویی زمینی جهانی تکامل یافته (E-UTRAN). شبکه ۲۰۱۱ EUTRA. موجود به صورت آنلاین: <https://portal.3gpp.org/desktopmodules/Specifications/SpecificationDetails.aspx?specificationId=849> (دسترسی در ۲۵ آوریل ۲۰۲۴).
۲۸. فوکاس، ایکس.؛ پاتوناس، جی.؛ الموکاشفی، ای.؛ مارینا، ام.کی. برش شبکه در 5G: بررسی و چالش ها. مجله ارتباطات IEEE ۲۰۱۷، ۵۵، ۹۴-۱۰۰. [کراس رف]
۲۹. ماموشیان، ل.؛ دلامینی، س. بهره گیری از SDN/NFV به عنوان سنگ بنای اصلی ورود به عصر 5G در بازارهای نوظهور. در مجموعه مقالات اجلاس جهانی بی سیم (GWS) IEEE، 2017، کیپ تاون، آفریقای جنوبی، ۱۵ تا ۱۸ اکتبر ۲۰۱۷؛ صفحات ۲۳ تا ۲۷.
۳۰. طالب، ت.؛ افولابی، آی.؛ سمدانیس، ک.؛ یوسف، ف.ز. درباره معماری هماهنگ سازی برش شبکه چند دامنه ای و کنترل منابع فدرال. شبکه IEEE ۲۰۱۹، ۳۳، ۲۴۲-۲۵۲. [کراس رف]
۳۱. توماشفسکی، ل.؛ کولکینسکی، س.؛ کولاکوفسکی، ر. رویکردی جدید به ادغام 5G و MEC. در مجموعه مقالات کنفرانس بین المللی IFIP در مورد کاربردها و نوآوری های هوش مصنوعی، نیئوس مارمارا، یونان، ۷-۵ ژوئن ۲۰۲۰؛ اشپرینگر: برلین/هایدلبرگ، آلمان، ۲۰۲۰؛ صفحات ۱۵-۲۴.
۳۲. کولکینسکی، س.؛ توماشفسکی، ل. داسمو: رویکردی مقیاس پذیر برای مدیریت و هماهنگ سازی برش های شبکه. در مجموعه مقالات سمپوزیوم عملیات و مدیریت شبکه IEEE، IEEE/IFIP NOMS 2018-2018، تایپه، تایوان، ۲۳-۲۷ آوریل ۲۰۱۸؛ صفحات ۱-۶.
۳۳. کولکینسکی، س.؛ توماشفسکی، ل.؛ کولاکوفسکی، ر. درباره ادغام SON، MEC، O-RAN و Network Slicing. در مجموعه مقالات کارگاه های IEEE (GC Wkshps) IEEE Globecom 2020، تایپه، تایوان، ۷ تا ۱۱ دسامبر ۲۰۲۰؛ صفحات ۱ تا ۶.
- گزارش فنی. ۲۰۲۰. به صورت آنلاین در دسترس است. MEC 5؛ یکپارچه سازی MEC (محاسبات لبه ای با دسترسی چندگانه ETSI، ۳۴. https://www.etsi.org/deliver/etsi_gr/MEC/001_099/031/02.01.01_60/gr_MEC031v020101p.pdf (دسترسی در ۲۵ آوریل ۲۰۲۴).
- دردسترس آنلاین. 2020. O Que é e Como Codar Com Esse Micro Framework Python. GeekHunter. فلاسک: <https://blog.geekhunter.com.br/flask-framework-python/35> (دسترسی در ۲۱ فوریه ۲۰۲۰).
۳۶. ETSI. ارتباط کاربری دستگاه. گزارش فنی. ۲۰۲۰. به صورت آنلاین در دسترس است (MEC) محاسبات لبه ای با دسترسی چندگانه ETSI، ۳۶. https://www.etsi.org/deliver/etsi_gs/MEC/001_099/016/02.02.01_60/gs_mec016v020201p.pdf (دسترسی در ۱۴ مه ۲۰۲۴).
۳۷. کوپرنیتز. کوپرنیتز. ۲۰۲۱. به صورت آنلاین در دسترس است: <https://kubernetes.io/pt-br/docs/> (دسترسی در ۲۹ آگوست ۲۰۲۲).
۳۸. مونگو دی بی. مونگو دی بی. ۲۰۲۲. به صورت آنلاین در دسترس است: <https://www.mongodb.com/pt-br/> (دسترسی در ۲۹ آگوست ۲۰۲۲).
۳۹. ویجتیلکا، س.؛ لیاناژ، م. بررسی برش شبکه برای تحقق اینترنت اشیا در شبکه های 5G. آموزش های ارتباطات و بررسی IEEE ۲۰۲۱، ۲۴، ۹۵۷-۹۹۴. [کراس رف]
۴۰. ژانگ، دی.؛ رودریگز، جی.؛ جی.؛ ژای، وای.؛ ساتو، تی. طراحی و پیاده سازی سیستم های سلامت الکترونیکی 5G: فناوری ها، موارد استفاده و چالش های آینده. مجله ارتباطات IEEE ۲۰۲۱، ۵۹، ۸۵-۸۰. [کراس رف]
۴۱. پورامباج، پ.؛ اوکویه، ج.؛ لیاناژ، م.؛ یلیانتیلا، م.؛ طالب، ت. بررسی محاسبات لبه ای با دسترسی چندگانه برای تحقق اینترنت اشیا. مدرس ارتباطات، نظارت و ارزیابی IEEE ۲۰۱۸، ۲۰، ۲۹۶۱-۲۹۹۱. [کراس رف]
- یک چارچوب تست بار مدرن. ۲۰۲۲. به صورت آنلاین در دسترس است: <https://locus.io/۴۲>. Locust. Locust—(دسترسی در ۹ فوریه ۲۰۲۲).
- سلب مسئولیت/یادداشت ناشر:** اظهارات، نظرات و داده های موجود در تمام نشریات صرفاً متعلق به نویسنده (گان) و مشارکت کننده (گان) است و نه MDPI و/یا سردبیر (گان). MDPI و/یا سردبیر (گان) مسئولیت هرگونه آسیب به افراد یا اموال ناشی از هرگونه ایده، روش، دستورالعمل یا محصولی که در محتوا به آن اشاره شده است را از خود سلب می کنند.