علوم رایانش و فناوری اطلاعات
نشریه علمی انجمن کامپیوتر ایران
مجلد ۲۲، شماره ۱، ۱۴۰۳
صفحات ۵۸-۷۳
مقاله پژوهشی

چارچوبی مبتنی بر معیارهای قابلیت اطمینان چندگانه و زنجیره مارکوف برای انتخاب بهینه سرویس‌های ابری

فریده لطیفی[۱]، رامین نصیری[۲*]، مهران محسن زاده[۳]، حمیدرضا مصطفایی[۴]

[*]نویسنده مسئول، دریافت: ۱۴۰۲/۰۴/۲۷، بازنگری: ۱۴۰۳/۰۳/۰۳، پذیرش: ۱۴۰۳/۰۴/۱۲ (**تاریخ‌ها توسط نشریه وارد می‌شوند**)

[۱] گروه مهندسی کامپیوتر، واحد علوم و تحقیقات، دانشگاه آزاد اسلامی، تهران، ایران.

[۲] گروه مهندسی کامپیوتر، واحد تهران مرکزی، دانشگاه آزاد اسلامی، تهران، ایران.

[۳] گروه مهندسی کامپیوتر، واحد علوم و تحقیقات، دانشگاه آزاد اسلامی، تهران، ایران.

[۴] گروه آمار، واحد تهران شمال، دانشگاه آزاد اسلامی، تهران، ایران.

چکیده

نرم‌افزار سرویس (SaaS) روش تحویل را به‌طور چشمگیری متحول کرده است. این مدل تحویل نرم‌افزار مزایای متعددی به همراه دارد، ازجمله کاهش هزینه‌ها، افزایش بهره‌وری، دسترسی به فناوری‌های نوین بدون نیاز به سرمایه‌گذاری اضافی، تمرکز بیشتر بر فرآیندهای اصلی کسب‌وکار و تقویت نوآوری. این مزایا به‌ویژه برای کسب‌وکارهای کوچک و متوسط بسیار جذاب هستند. بااین‌حال، به دلیل تنوع بالای سرویس‌ها و عوامل مختلف، انتخاب یک سرویس SaaS قابل‌اطمینان که نیازهای کسب‌وکار را برآورده کند می‌تواند چالشی باشد.

در حال حاضر، ابزاری بر مبنای چندین معیار قابلیت اطمینان و پیگیری تغییرات آن برای رتبه‌بندی مقایسه‌ای سرویس‌های SaaS وجود ندارد. در این پژوهش، یک چارچوب جدید مبتنی بر معیارهای چندگانه قابلیت اطمینان و زنجیره مارکوف (MVRM-CC) برای رتبه‌بندی سرویس‌های SaaS معرفی‌شده است. در این چارچوب، از زنجیره مارکوف برای ثبت و پیگیری تغییرات در قابلیت اطمینان سرویس‌های SaaS و تعیین مقادیر نهایی آن‌ها استفاده می‌شود.

تحلیل جامع شامل تحلیل حساسیت چند سطحی و مقایسه با رویکردهای موجود نشان می‌دهد که چارچوب پیشنهادی از پایداری بالاتر و نوسانات کمتری نسبت به سایر رویکردها برخوردار است. این چارچوب به مشتریان کمک می‌کند تا سرویس‌های SaaS را بر اساس نیازها و ترجیحات خود به‌طور کارآمد انتخاب کنند و به ارائه‌دهندگان نیز کمک می‌کند تا موقعیت سرویس و انتظارات مشتریان را بهتر درک کنند.

کلمات کلیدی: انتخاب سرویس، رایانش ابری، زنجیره مارکوف، قابلیت اطمینان SaaS (نرم‌افزار به‌عنوان سرویس)، معیارهای قابلیت اطمینان SaaS.

۱- مقدمه

انتخاب سرویس‌های ابری نقش بحرانی در رایانش ابری و نیاز به تلاش‌های تحقیقاتی گسترده‌ای دارد تا چالش‌های مرتبط با فرآیند تصمیم‌گیری در این حوزه را مدیریت کرد. در طول سال‌ها، روش‌ها و چارچوب‌های متعددی برای کمک به کاربران در انتخاب سرویس‌ها و ارائه‌دهندگان ابری مناسب بر اساس درخواست‌ها و ترجیحات خاص آن‌ها پیشنهادشده است. بااین‌حال، تحقیقات پیشین محدودیت‌هایی درروش‌های موجود نشان داده‌اند که نیازمند توسعه راهکارهای نوین است.

مطالعات قبلی به‌طور قابل‌توجهی به حوزه انتخاب سرویس‌های ابری کمک کرده‌اند [۱-۳]. این تلاش‌ها مزایا و معایبی را در محیط‌ها، برنامه‌ها و محدودیت‌ها مشخص کرده‌اند. بسیاری از این تحقیقات از معماری کارگزار ابری استفاده کرده‌اند. در این معماری، مشتریان ابری درخواست‌های خود را به کارگزاران ابری اعلام کرده، سپس کارگزاران فهرستی از سرویس‌های ابری بالقوه را پیشنهاد می‌دهند [۴-۷] (شکل۱). برای محاسبه وزن معیارهای کیفیت سرویس، روش‌های فرآیند تحلیل سلسله‌مراتبی و فرآیند تحلیل شبکه استفاده‌شده است.

بااین‌وجود، این روش‌ها دچار محدودیت‌هایی مانند ناسازگاری در تولید نتایج و پیچیدگی محاسباتی هستند. هدف از این مقاله، بهبود و گسترش رویکردهای قبلی و رفع محدودیت‌های شناسایی‌شده در تحقیقات پیشین است. در این مطالعه، یک چارچوب برای انتخاب سرویس‌های ابری بر اساس زنجیره مارکوف[1] و معیارهای قابلیت اطمینان ارائه‌شده است که با استفاده از مدل زنجیره مارکوف، به تغییرات در قابلیت اطمینان سرویس‌های ابری توجه می‌کند. استفاده از این مدل باعث پیش‌بینی دقیق‌تر عملکرد و قابلیت اطمینان سرویس‌ها می‌شود که منجر به انتخابی سازگارتر و قابل‌اعتمادتر می‌شود. این چارچوب، با در نظر گرفتن معیارهای متعدد، به کاربران کمک می‌کند تا قابلیت اطمینان سرویس‌های ابری را بهتر درک کنند و تصمیم‌گیری آگاهانه‌تر و هدفمندتری را انجام دهند. از تحلیل‌های متنوعی مانند تحلیل مطابقت رتبه، انحراف معیار، تحلیل حساسیت، پیچیدگی زمانی و تطابق با تغییر گزینه‌ها استفاده می‌شود تا سازگاری چارچوب با تولید نتایج مناسب در انتخاب سرویس‌های ابری نشان داده شود. علاوه بر این، این چارچوب راه‌حلی مبتنی بر مدل زنجیره مارکوف از مرتبه خطی ارائه می‌دهد که به کاهش پیچیدگی محاسباتی کمک کرده و فرایند انتخاب را ساده‌تر و تصمیم‌گیری را آگاهانه‌تر می‌سازد.

این مقاله تعدادی مشارکت مهم را به خود اختصاص می‌دهد:

- **معیارهای قابلیت اطمینان چندگانه:** با ترکیب معیارهای قابلیت اطمینان مختلف، کاربران می‌توانند درک جامعی از قابلیت اطمینان سرویس‌های ابری پیدا کنند و تصمیم‌گیری بهتری داشته باشند.
- **مدل زنجیره مارکوف:** در این چارچوب، از زنجیره مارکوف برای ثبت و پیگیری تغییرات در قابلیت اطمینان سرویس‌های SaaS[2] و تعیین مقادیر نهایی آن‌ها استفاده می‌شود.
- **سازگاری راه‌حل بهبودیافته:** تحلیل‌های مقایسه‌ای نشان می‌دهد که چارچوب MVRM-CC قادر است همواره راه‌حل‌های قابل‌اطمینانی را ارائه دهد و انتخاب سرویس‌های ابری ناقص را به حداقل برساند.

ساختار این مقاله به شرح زیر است: در بخش ۲، مروری بر تحقیقات پیشین صورت می‌گیرد. در بخش ۳، دلایل انگیزشی مرتبط با مسئله انتخاب سرویس‌های ابری موردبررسی قرار می‌گیرد. در بخش ۴، معیارهای کیفیت سرویس[3] کلیدی مرتبط با محیط ابری تعریف می‌شوند.

برای رفع محدودیت‌های شناسایی‌شده در تحقیقات پیشین، در بخش ۵، چارچوب MVRM-CC پیشنهادی معرفی می‌شود. در بخش ۶، روش پیشنهادی برای انتخاب سرویس‌های ابری تشریح می‌شود و مراحل و ملاحظات مربوطه توضیح داده می‌شوند. اثربخشی روش پیشنهادی از طریق یک مطالعه موردی با استفاده از مجموعه داده‌های واقعی در بخش ۷ بحث می‌شود. در بخش ۸، تحلیل جامعی از روش پیشنهادی ارائه می‌شود و عملکرد آن با روش‌های موجود مقایسه می‌شود. درنهایت، در بخش ۹، مقاله با خلاصه کردن یافته‌های اصلی به پایان می‌رسد و مشارکت‌ها و تأثیرات را برجسته می‌کند.

۲- پیشینه پژوهش

در چند سال گذشته، تحقیقات قابل‌توجهی برای مواجهه با مسئله انتخاب سرویس‌های ابری صورت گرفته است. چندین مطالعه در این زمینه در ادامه خلاصه‌شده‌اند.

نویسندگان در [۸] یک روش مؤثر برای مدیریت درخواست‌های نامعین کاربران با تعریف یک بازه درخواست و حذف سرویس‌هایی که خارج از این بازه قرار می‌گیرند، پیشنهاد می‌دهند. آن‌ها از فرآیند تحلیل سلسله‌مراتبی[4] [۹]، برای رتبه‌بندی استفاده می‌کنند و این روش را بر اساس تحلیل بهینگی، مقیاس‌پذیری و حساسیت ارزیابی می‌کنند. نتایج، برتری روش آن‌ها را نسبت به روش‌های قبلی نشان می‌دهند.

یک جنبه مهم دیگر در رایانش ابری انتخاب فروشندگان سرویس‌های ابری است که یک مسئله تصمیم‌گیری پیچیده است که تحت تأثیر رفتار و شناخت انسان قرار می‌گیرد. [۱۰] با پیشنهاد یک رویکرد تصمیم‌گیری غیرخطی برای انتخاب فروشندگان ابری به این چالش پاسخ می‌دهد. روش آن‌ها شامل مقیاس دهی مقیاس لیکرت، تبدیل ویژگی‌ها با استفاده از فضای چندجمله‌ای، تعیین وزن ویژگی‌ها با استفاده از روش CRITIC و استفاده از روش رتبه‌بندی شخصی‌سازی‌شده فروشندگان با استفاده از روش WASPAS و طرح‌های ترکیب رتبه‌بندی است. رویکرد پیشنهادی از طریق یک مطالعه موردی تأییدشده است و از طریق مقایسه و تجزیه‌وتحلیل حساسیت، کارآمدی و پایداری خود را نشان می‌دهد.

[۱۱] روشی ترکیبی برای ارزیابی سرویس‌های مختلف ابری پیشنهاد می‌دهد. رویکرد آن‌ها مبتنی بر استفاده از ارزیابی جامع جنبه‌های ذهنی و بومی برای رتبه‌بندی ارائه‌دهندگان سرویس‌های ابری[5] بر اساس درخواست‌های کاربر است. این روش از طریق یک مطالعه موردی در زندگی واقعی تأییدشده است و بهبود رضایت و کارایی در دقت و قابلیت اطمینان را نشان می‌دهد. به‌طور مشابه، نویسندگان در [۱۲] یک مدل تصمیم‌گیری چند معیاره برای انتخاب سرویس‌های ابری ارائه می‌دهند. این روش شامل ساختار SMICloud، ارزش‌های فازی برای درخواست‌های مبهم کاربر، فرآیند تحلیل سلسله‌مراتبی و منطق فازی برای رتبه‌بندی سرویس‌های ابری است. آن‌ها همچنین روش دلفی فازی[۱۳] را برای کاهش زمان اجرا معرفی می‌کنند. نتایج ارزیابی‌ها، برتری زمان اجرا، مقیاس‌پذیری و دقت روش پیشنهادی را نشان می‌دهند.

انتخاب مناسب‌ترین پلتفرم سرویس‌های پایگاه داده ابری برای مدیریت کارآمد سازمان در منظر رقابتی امروزی بسیار حائز اهمیت است. همچنین، این امکان را به سازمان‌ها می‌دهد تا فشارهای بازار را برطرف کنند و درخواست‌های مشتریان را برآورده سازند درحالی‌که نوآوری و کاهش هزینه را ترویج می‌کنند. پژوهشگران به‌منظور مقابله با این چالش، روش‌های تصمیم‌گیری و چارچوب‌های نوآورانه‌ای را پیشنهاد داده‌اند. نویسندگان در [۱۴] مدل PT-PUL-TODIM را توسعه داده‌اند که رویکرد TODIM و رویکرد زبانی غیرقطعی را یکپارچه می‌کند. این مدل از

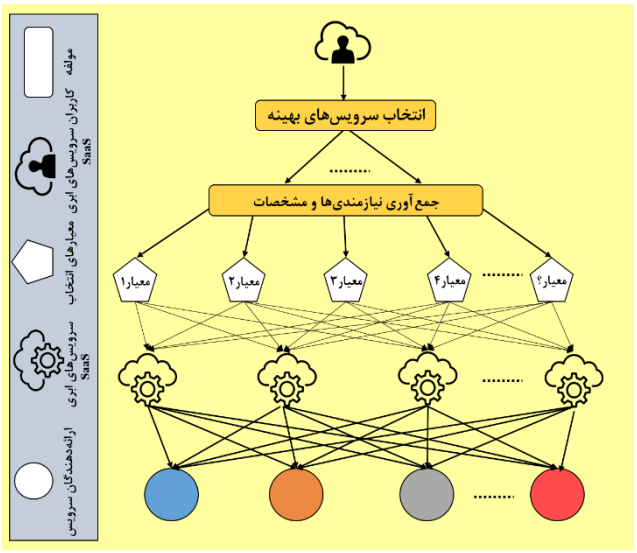
[1] Markov chain
[2] Software-as-a-Service
[3] QoS (Quality of Service)
[4] AHP (Analytic Hierarchy Process)
[5] CSPs (Cloud Service Providers)

مجموعه‌های عبارت غیرقطعی با احتمال اطمینان استفاده می‌کند و ازنظریه آماری چشم‌انداز تجمعی برای محاسبه وزن‌های جمعی استفاده می‌کند. تکنیک CRITIC وزن‌های معیارهای هدف را تعیین می‌کند و رویکرد PT-PUL-TODIM پیشنهادی مناسب‌ترین پلتفرم سرویس‌های پایگاه داده ابری را انتخاب می‌کند. تجزیه‌وتحلیل مقایسه‌ای و حساسیت نشان می‌دهد که این رویکرد عملیاتی است.

[۱۵] یک چارچوب محاسباتی مبتنی بر منطق فازی برای رتبه‌بندی سرویس‌های ابری پیشنهاد می‌دهد. این چارچوب روش‌های Fuzzy-AHP [۱۶] و TOPSIS [۱۷] را ترکیب می‌کند تا سرویس‌ها را بر اساس معیارهای کیفیت سرویس ارزیابی و رتبه‌بندی کند. محققان در [۱۸] با استفاده از چارچوب CSSCI و استفاده از انتگرال Choquet و معیار فازی [۱۹-۲۱]، تعاملات معیارها را موردبررسی قراردادند. آن‌ها اهمیت Shapley و شاخص تعامل معیارها را با استفاده از یک مدل بهینه‌سازی محدودیت غیرخطی تخمین زدند. [۲۲] یک روش تصمیم‌گیری چند معیاره ترکیبی برای انتخاب سرویس‌های ابری ارائه می‌دهد. این روش وابستگی‌های میان معیارهای عملکرد را مدنظر قرار می‌دهد و از روش DEMATEL-ANP [۲۳]، استفاده می‌کند. [۷] مدل SELCLOUD را برای انتخاب سرویس‌های ابری با استفاده از تکنیک خاکستری [۷, ۲۴, ۲۵] و فرآیند تحلیل سلسله‌مراتبی معرفی کرده است. [۲۶] یک چارچوب یکپارچه برای ارزیابی و انتخاب ارائه‌دهندگان رایانش ابری با استفاده از مجموعه‌های فازی شهودی باارزش بازه‌ای ارائه کرده است. در [۲۷] به توسعه رویکرد IIVIFS-WASPAS برای انتخاب ارائه‌دهندگان سرویس‌های ابری قابل‌اعتماد بر اساس صفات مرتبط باکیفیت سرویس و ارزیابی وزن اهداف مختلف پرداخته‌شده است. [۲۸] چارچوب G-TOPSIS را برای انتخاب سرویس‌های ابری با استفاده از توزیع گاوسی برای مقابله با مسئله رتبه‌بندی معکوس ارائه می‌دهد. این چارچوب سرویس‌های ابری را بر اساس معیارهای کیفیت سرویس رتبه‌بندی کرده و تصمیم‌گیری قابل‌اعتمادی را برای کاربران سرویس‌های ابری فراهم می‌کند.

[۲۹] چارچوب CSSaaS را با استفاده از روش FLBWM برای انتخاب سرویس‌های ابری در محیطی فازی ارائه می‌دهد. این چارچوب اطلاعات ناپیوسته را کنترل می‌کند و سرویس‌های رتبه‌بندی و پیشنهاد قابل‌اعتمادی ارائه می‌دهد. [۳۰] یک چارچوب انتخاب سرویس‌های ابری برای محیط نوتروسوفیک [۳۱] را پیشنهاد می‌دهد. این چارچوب از روش‌های TOPSIS [۳۲] و نظریه مجموعه نوتروسوفیک برای مدیریت عدم قطعیت استفاده می‌کند و رتبه‌بندی قابل‌اعتمادی ارائه می‌دهد. در مدل Cloud-CoCoSo از روش‌های جمع وزن‌دار و ماتریس وزن‌های دقیق، برای انتخاب ارائه‌دهنده سرویس‌های ابری قابل‌اعتماد با توجه به عدم قطعیت در مقادیر کیفیت سرویس، استفاده می‌شود [۳۳]. [۳۴] تجزیه‌وتحلیل مقایسه‌ای روش‌های MCDM برای انتخاب سرویس‌های ابری را با تمرکز بر زمان پیچیدگی و پایداری ارائه می‌دهد. [۳۵] روشی بر اساس گراف برای رتبه‌بندی ارائه‌دهندگان سرویس‌های ابری پیشنهاد می‌دهد و برتری آن را نسبت به روش‌های سنتی نشان می‌دهد. [۳۶] یک مدل تصمیم‌گیری مبتنی بر داده‌های بزرگ با استفاده از اطلاعات زبان احتمال و الگوریتم امتیازدهی برای انتخاب سرویس‌های ابری پیشنهاد می‌دهد.

[۳۷] یک مدل سرویس‌های ابری ترکیبی با استفاده از فنون تصمیم‌گیری چند معیاره و امتیازهای اهداف مختلف ارائه می‌دهد. نویسندگان در [۳۸] چارچوب SelTCS را توسعه داده‌اند که ارزیابی اعتماد اهداف مختلف را ترکیب می‌کند تا به مشتریان در انتخاب سرویس‌های ابری قابل‌اعتماد کمک کند. این چارچوب اولویت‌بندی صفات مرتبط باکیفیت سرویس را بر اساس ترجیحات کاربران انجام می‌دهد و دقت ارزیابی اعتماد را بهبود می‌بخشد و از روش‌های موجود عملکرد بهتری دارد. [۳۹] چارچوب CCS-OSSR را با استفاده از رویکرد تصمیم‌گیری چند معیاره ترکیبی برای انتخاب سرویس‌های ابری قابل‌اعتماد بر اساس معیارهای کیفیت سرویس معرفی کرده است. این روش، بهترین راه‌حل‌ها را نسبت به روش‌های موجود ارائه می‌دهد. نویسندگان در [۴۰] یک چارچوب محاسباتی را با ترکیب فرآیند تحلیل سلسله‌مراتبی و TOPSIS برای انتخاب مناسب‌ترین سرویس‌های ابری پیشنهاد می‌دهند. رویکرد آن‌ها با استفاده از مطالعات موردی و تجزیه‌وتحلیل حساسیت تأییدشده است و کارایی و صحت آن را نشان می‌دهد.



شکل ۱- یک سناریوی متداول برای انتخاب سرویس‌های ابری[۶, ۷, ۴۱-۴۳]

۳- سناریوی انگیزشی

تصور کنید که شما صاحب یک کسب‌وکار اینترنتی هستید که از رایانش ابری برای گسترش فعالیت‌های خود استفاده می‌کنید. بااین‌حال، انتخاب سرویس‌های ابری قابل‌اطمینان، وظیفه‌ای دشوار است. برای مقابله با این چالش، چارچوب MVRM-CC یک راه‌حل ارائه می‌دهد. با تلفیق چندین معیار قابلیت اطمینان و استفاده از یک مدل زنجیره مارکوف، این چارچوب یک رویکرد جامع برای انتخاب سرویس‌های ابری فراهم می‌کند. چارچوب MVRM-CC ابعاد مختلفی از قابلیت اطمینان مانند دسترسی‌پذیری، عملکرد و تحمل خطا را در نظر می‌گیرد. با در نظر گرفتن چندین عامل، این چارچوب ارزیابی کامل‌تری نسبت به سرویس‌های ابری ارائه می‌دهد. با به‌کارگیری چارچوب MVRM-CC، کسب‌وکارها می‌توانند در انتخاب سرویس‌های ابری تصمیمات مطمئن و آگاهانه‌ای اتخاذ کنند. درنهایت، استفاده از این چارچوب منجر بهبود ارائه سرویس‌ها، افزایش رضایت مشتریان و قابلیت بهره‌برداری از توانمندی کامل رایانش ابری برای رشد و موفقیت کسب‌وکار می‌شود.

۴- معیارهای مرتبط باقابلیت اطمینان SaaS

برای ارزیابی بهینه سرویس‌های ابری از نوع SaaS، تعیین معیارهای کیفیت سرویس و قابلیت اطمینان[۱] که شامل ویژگی‌های عملکردی و غیر عملکردی هستند، بسیار مهم است. بااین‌حال، نبود یک مدل استاندارد برای کیفیت سرویس می‌تواند این وظیفه را پیچیده کند. برای رفع این مشکل، کنسرسیوم CSMIC مجموعه‌ای از شاخص‌های عملکرد کلیدی[۲] تجاری را پیشنهاد کرده است که شامل معیارهای پاسخگویی[۳]، قابلیت استفاده[۴]، قابلیت اطمینان، هزینه[۵]، عملکرد[۶]، امنیت[۷] و حریم

[1] Reliability
[2] KPI (Key Performance Indicators)
[3] Accountability
[4] Usability
[5] Cost
[6] Performance
[7] Security

خصوصی[1] است. لازم به ذکر است که قابلیت اطمینان به‌عنوان یک معیار فرعی از معیار تضمین[2] است [۶, ۴۴, ۴۵].

- **معیارهای کیفیت سرویس**

معیارهای کیفیت سرویس بسته به نیازهای خاص سرویس‌های ابری می‌توانند متفاوت باشند. برخی معیارها برای انواع خاصی از سرویس‌ها اهمیت بیشتری دارند. به‌عنوان‌مثال، قابلیت نصب[3] برای سرویس‌های زیرساخت به‌عنوان سرویس (IaaS[4]) مهم‌تر از سرویس‌های SaaS است، زیرا SaaS معمولاً شامل نصب در سمت مشتری نمی‌شود [۶].

- **سطوح مختلف قابلیت اطمینان در SaaS**

قابلیت اطمینان یک سرویس SaaS با توجه به عملکرد کلی تمامی ویژگی‌های کیفی آن ارزیابی می‌شود [۴۵, ۴۶]. این ویژگی‌ها به دسته‌های مختلفی شامل دسترسی‌پذیری، زمان پاسخ، یکپارچگی داده، تحمل خطا و مقیاس‌پذیری تقسیم‌بندی شده‌اند. در شکل ۲، ساختار سلسله‌مراتبی قابلیت اطمینان SaaS نمایش داده‌شده است که در آن هر دسته‌بندی و زیرمجموعه‌های مربوط به هر ویژگی به‌وضوح مشخص و تعریف‌شده‌اند:

۱. دسترسی‌پذیری[5]

درصد زمانی که سرویس در دسترس و قابل‌استفاده است. این معیار به کاربران اطمینان می‌دهد که سرویس بدون وقفه در دسترس خواهد بود.

$$\boldsymbol{Availability} = \frac{\boldsymbol{Uptime}}{\boldsymbol{Uptime+Downtime}} \quad (۱)$$

این ویژگی شامل زیر معیارهای زیر است:

۱/۱. Uptime

مدت‌زمانی که سیستم در دسترس و قابل‌استفاده است. بیشتر بودن زمان این معیار نشان‌دهنده قابلیت اطمینان بالاتر سیستم است.

۱/۲. Downtime

مدت‌زمانی که سیستم در دسترس نیست و نمی‌تواند به درخواست‌های کاربران پاسخ دهد.

۱/۳. میانگین زمان بین خرابی‌ها[6]

مدت‌زمان متوسط بین دو خرابی متوالی سیستم. هر چه این زمان بیشتر باشد، نشان‌دهنده قابلیت اطمینان بالاتر سیستم است.

$$\boldsymbol{MTBF} = \frac{\boldsymbol{Total\ Operational\ Time}}{\boldsymbol{Number\ of\ Failures}} \quad (۲)$$

که در آن $\boldsymbol{Total\ Operational\ Time}$ کل مدت‌زمانی است که سیستم به‌طور صحیح عمل کرده است و $\boldsymbol{Number\ of\ Failures}$ کل خرابی‌های رخ داده در سیستم است.

۱/۴. میانگین زمان تعمیر[7]

مدت‌زمان متوسط برای تعمیر سیستم و بازگرداندن آن به حالت عملیاتی پس از خرابی.

$$\boldsymbol{MTTR} = \frac{\boldsymbol{Total\ Repair\ Time}}{\boldsymbol{Number\ of\ Repairs}} \quad (۳)$$

که در آن $\boldsymbol{Total\ Repair\ Time}$ کل مدت‌زمانی است که برای تعمیر سیستم صرف شده است و $\boldsymbol{Number\ of\ Repairs}$ تعداد دفعات تعمیرات انجام‌شده است.

۲. زمان پاسخ

زمان لازم برای پاسخ‌دهی به درخواست‌های کاربران. این معیار نشان‌دهنده سرعت عملکرد سرویس است و تأثیر مستقیم بر تجربه کاربری دارد.

$$\boldsymbol{Average\ Response\ Time} = \frac{\sum_{i=1}^{n} \boldsymbol{Response\ Time_i}}{\boldsymbol{n}} \quad (۴)$$

که در آن $\boldsymbol{Response\ Time_i}$ زمان پاسخ به درخواست i و n تعداد کل درخواست‌ها است.

این ویژگی شامل زیر معیارهای زیر است:

۲/۱. زمان پاسخ سرور

مدت‌زمانی که سرور برای پاسخ به یک درخواست صرف می‌کند.

۲/۲. زمان پاسخ برنامه

مدت‌زمانی که برنامه برای پاسخ به درخواست کاربر صرف می‌کند.

۲/۳. زمان تا اولین بایت

مدت‌زمانی که طول می‌کشد تا اولین بایت داده از سرور به کاربر برسد.

۲/۴. زمان بارگذاری کامل

مدت‌زمانی که طول می‌کشد تا صفحه به‌طور کامل بارگذاری شود.

۳. یکپارچگی داده

تضمین می‌کند که داده‌ها به‌طور صحیح و بدون تغییرات ناخواسته ذخیره و بازیابی می‌شوند. این معیار برای اطمینان از صحت و درستی داده‌ها اهمیت زیادی دارد. این ویژگی شامل زیر معیارهای زیر است:

۳/۱. صحت داده

تضمین درستی و صحت داده‌های ذخیره‌شده.

۳/۲. کامل بودن داده

تضمین کامل بودن و عدم وجود داده‌های ناقص.

۳/۳. امنیت داده

محافظت از داده‌ها در برابر دسترسی‌های غیرمجاز و فساد.

۳/۴. ردیابی داده

توانایی ردیابی تغییرات داده و تاریخچه آن‌ها.

۴. تحمل خطا

توانایی سرویس در ادامه عملکرد بدون از دست دادن داده‌ها یا کاهش کیفیت در صورت وقوع خطاها. این معیار نشان می‌دهد که سرویس تا چه حد می‌تواند در برابر خطاها مقاومت کند و به عملکرد خود ادامه دهد. این ویژگی شامل زیر معیارهای زیر است:

۴/۱. تشخیص خطا

تشخیص خطا به معنای توانایی سیستم در شناسایی خطاها در زمان وقوع است. ابزارها و فنون مختلفی برای تشخیص خطا استفاده می‌شوند، ازجمله سامانه‌های مانیتورینگ و لاگ‌گیری.

---

[1] Privacy
[2] Assurance
[3] Installability
[4] Infrastructure -as-a-Service
[5] Availability
[6] MTBF (Mean Time Between Failures)
[7] MTTR(Mean Time To Repair)

۴/۲. بازگردانی خودکار

بازگردانی خودکار به معنای توانایی سیستم در بازگردانی به حالت عملیاتی پس از وقوع خطا است. این قابلیت شامل استفاده از سامانه‌های پشتیبان گیری، بازیابی داده‌ها و روش‌های تصحیح خودکار خطا است.

۴/۳. تنوع‌پذیری

تنوع‌پذیری به معنای استفاده از منابع اضافی و جایگزین برای مقابله با خرابی‌ها است. این می‌تواند شامل سرورهای اضافی، پایگاه‌های داده پشتیبان و سامانه‌های ذخیره‌سازی موازی باشد.

۴/۴. جداسازی خطا

جداسازی خطا به معنای توانایی سیستم در محدود کردن اثرات خطا به بخش‌های خاصی از سیستم است. این قابلیت می‌تواند با استفاده از معماری‌های ماژولار و روش‌های ایزوله‌سازی بخش‌های مختلف سیستم به دست آید.

۵. مقیاس‌پذیری[1]

مقیاس‌پذیری توانایی سیستم در افزایش ظرفیت و عملکرد با توجه به افزایش بار کاری و تقاضاهای کاربران را نشان می‌دهد. یکی از شاخص‌های مقیاس‌پذیری، نرخ افزایش کارایی سیستم در مواجهه با افزایش بار کاری است.

$$\boldsymbol{Scalability\ Ratio} = \frac{\boldsymbol{Performance\ at\ High\ Load}}{\boldsymbol{Performance\ at\ Base\ Load}} \quad (۵)$$

که در آن $\boldsymbol{Performance\ at\ High\ Load}$ عملکرد سیستم در بار کاری بالا و $\boldsymbol{Performance\ at\ Base\ Load}$ عملکرد سیستم در بار کاری پایه است.

این ویژگی شامل زیر معیارهای زیر است:

۵/۱. افزایش منابع

افزایش منابع به معنای توانایی سیستم در اضافه کردن منابع (مانند پردازنده، حافظه و پهنای باند) به‌صورت پویا با افزایش بار کاری است. این قابلیت می‌تواند با استفاده از زیرساخت‌های ابری و فنون مدیریت منابع به دست آید.

۵/۲. بالانس بار

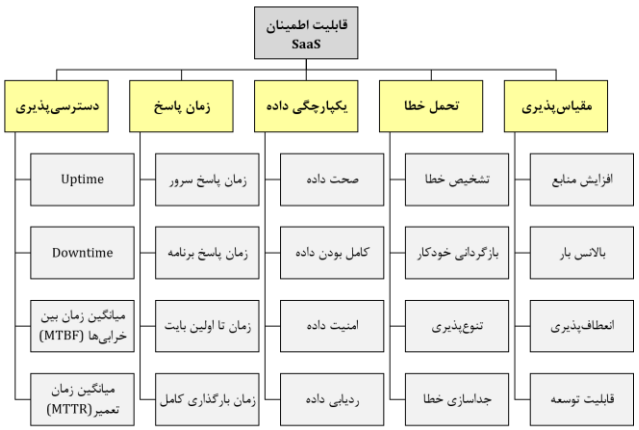
بالانس بار به معنای توانایی سیستم در توزیع متوازن بار کاری بین سرورها و منابع مختلف است. این قابلیت با استفاده از الگوریتم‌های توزیع بار و سامانه‌های بالانس بار سخت‌افزاری و نرم‌افزاری قابل‌دستیابی است.

۵/۳. انعطاف‌پذیری

انعطاف‌پذیری به معنای توانایی سیستم در سازگاری با تغییرات ناگهانی در بار کاری است، شامل افزایش یا کاهش ناگهانی تقاضا. این قابلیت می‌تواند با استفاده از فنون مقیاس‌پذیری پویا و استفاده از زیرساخت‌های ابری به دست آید.

۵/۴. قابلیت توسعه

قابلیت توسعه به معنای توانایی سیستم در افزایش ظرفیت و عملکرد با اضافه کردن زیرساخت‌های جدید است. این قابلیت شامل استفاده از معماری‌های ماژولار و سامانه‌های توزیع‌شده است.



شکل ۲ سطوح مختلف قابلیت اطمینان در SaaS [۴۵]

۵- چارچوب پیشنهادی

این مقاله یک چارچوب جامع برای انتخاب سرویس‌های SaaS ارائه می‌دهد که به‌منظور رفع محدودیت‌ها و بهبود نتایج تحقیقات پیشین طراحی‌شده است. این چارچوب از مدل زنجیره مارکوف و معیارهای قابلیت اطمینان بهره می‌برد. استفاده از این مدل به کاربران کمک می‌کند تا با درک بهتری از تغییرات قابلیت اطمینان سرویس‌ها، انتخاب‌های سازگارتر و قابل‌اعتمادتر انجام دهند.

چارچوب پیشنهادی در چهار لایه مختلف سازمان‌دهی شده است که هرکدام نقش مهمی در بهبود انتخاب سرویس‌های SaaS ایفا می‌کنند (شکل ۳). این لایه‌ها شامل کاربران سرویس‌ها، معیارها، مدل زنجیره مارکوف و تصمیم‌گیری هستند. در ادامه، ارتباطات بین این لایه‌ها و اجزای هر لایه به‌طور دقیق تشریح شده است تا تأثیر متقابل آن‌ها و نقش کلیدی هر لایه در فرآیند کلی روشن شود.

- **لایه کاربران SaaS**

این لایه شامل کاربران سرویس‌های ابری SaaS (SCU) است که نیازها و انتظارات خود را از سرویس‌های ابری مطرح می‌کنند. در این بخش، جمع‌آوری درخواست‌ها (RG) و نظرسنجی‌ها و پرسشنامه‌ها (SQ) از کاربران انجام می‌شود تا نیازها و انتظارات آن‌ها بهتر درک شود. مصاحبه با کاربران (UI) نیز به شناخت دقیق‌تر از تجربه کاربری کمک می‌کند.

اطلاعات به‌دست‌آمده از کاربران به لایه معیارها منتقل می‌شود تا معیارهای مرتبط با نیازهای واقعی کاربران تنظیم شود. این بازخوردها همچنین به لایه تصمیم‌گیری کمک می‌کند تا اولویت‌های کاربران در انتخاب سرویس‌ها لحاظ شود.

- **لایه معیارها**

این لایه به تعریف و مدیریت معیارهای مورداستفاده برای ارزیابی سرویس‌های ابری SaaS می‌پردازد. معیارهای قابلیت اطمینان و کیفیت سرویس (RQSM)، شامل معیارهای دسترسی‌پذیری (AM) و معیارهای عملکرد (PM) در این لایه مشخص می‌شوند. این معیارها توسط فرآیندهای یکپارچه‌سازی معیارها (IM)، اولویت‌بندی معیارها (CP) و اختصاص وزن (WE) تنظیم و هماهنگ می‌شوند.

این لایه معیارهای موردنیاز برای ارزیابی سرویس‌های SaaS را به لایه مدل زنجیره مارکوف ارائه می‌دهد تا در تحلیل‌ها مورداستفاده قرار گیرند. همچنین، خروجی‌های این لایه به لایه تصمیم‌گیری منتقل می‌شوند تا تصمیم‌گیری‌ها بر اساس معیارهای صحیح انجام شود.

[1] Scalability

- **لایه مدل زنجیره مارکوف**

در این لایه، مدل زنجیره مارکوف (MCM) برای شناسایی الگوهای رفتاری سرویس‌های ابری SaaS استفاده می‌شود. تحلیل پویای سرویس (SDA)، تخصیص منابع (RACA)، تحلیل تغییرات عملکرد (PVA)، شناسایی الگوی رفتاری (BPI) و تحلیل انتقال حالت (STA) به‌منظور ارزیابی پایداری و تغییرات احتمالی قابلیت اطمینان سرویس‌ها مورداستفاده قرار می‌گیرند.

نتایج به‌دست‌آمده از تحلیل‌های مدل زنجیره مارکوف به لایه تصمیم‌گیری منتقل می‌شوند تا تصمیم‌گیری‌ها با دقت بالا انجام شوند. این لایه همچنین اطلاعات را از لایه معیارها دریافت می‌کند تا تحلیل‌های خود را بر اساس معیارهای تعریف‌شده انجام دهد.

- **لایه تصمیم‌گیری**

در این لایه، الگوریتم تصمیم‌گیری (DMA) و قوانین تصمیم‌گیری (DR) به کار گرفته می‌شوند تا بر اساس نتایج تحلیل‌ها، تصمیم‌گیری بهینه صورت گیرد. ارزیابی مخاطرات (RA) و رتبه‌بندی و انتخاب (SRS) سرویس‌ها نیز در این لایه انجام می‌شود.

این لایه نتایج تحلیل‌های انجام‌شده در لایه‌های دیگر را ترکیب کرده و بر اساس قوانین و الگوریتم‌های تعریف‌شده، تصمیم‌گیری نهایی را انجام می‌دهد. این فرآیندها باعث می‌شوند که انتخاب سرویس (SS) با دقت بالا و با در نظر گرفتن تمام جوانب مرتبط انجام شود.

شکل ۳- معماری چارچوب MVRM-CC

۶- روش طراحی‌شده در چارچوب پیشنهادی برای انتخاب سرویس‌های ابری

روش پیشنهادی (REMSS) برای شناسایی، اولویت‌بندی و انتخاب سرویس‌های ابری SaaS در این بخش معرفی‌شده است که ترکیبی از رویکردهای توأم قابلیت اطمینان و زنجیره مارکوف است.

۶-۱- جمع‌آوری درخواست‌ها

در اولین مرحله، تمامی درخواست‌های کاربران در خصوص انتخاب سرویس‌های ابری SaaS جمع‌آوری می‌شوند. این درخواست‌ها شامل ارزیابی سرویس‌های مختلف بر اساس معیارهای تعیین‌شده هستند.

۶-۲- معیارهای قابلیت اطمینان چندگانه

در این مرحله، برای هر یک از سرویس‌های ابری SaaS، معیارهای چندگانه قابلیت اطمینان (R) جمع‌آوری می‌شود. این معیارها برای ایجاد یک ماتریس مرتبط با معیارهای قابلیت اطمینان (RMM) ترکیب می‌شوند. RMM شامل 'r' ردیف نمایانگر معیارهای قابلیت اطمینان و 'm' ستون نمایانگر گزینه‌های سرویس‌های ابری SaaS است.

$$RMM = \begin{bmatrix} R_{1,1} & \cdots & R_{1,m} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ R_{r,1} & \cdots & R_{r,m} \end{bmatrix} \qquad (۶)$$

۶-۳- یکپارچه‌سازی معیارها

انتخاب سرویس‌های ابری SaaS بر اساس معیارهای مختلف قابلیت اطمینان، نیازمند فرآیند دقیق وزن دهی و نرمال‌سازی مقیاس‌ها است [۷, ۴۷]. این معیارها می‌توانند شامل دسترسی‌پذیری، زمان پاسخ، یکپارچگی داده، تحمل خطا و مقیاس‌پذیری باشند. در ادامه، مراحل کلی و جامع وزن دهی به درخواست‌ها و یکسان‌سازی مقیاس‌ها شرح داده می‌شود.

- **تخصیص وزن به معیارها**

هر معیار بر اساس اهمیت نسبی آن در سیستم موردنظر وزن دهی می‌شود. وزن دهی به معیارها به دلیل اهمیت نسبی آن‌ها در تصمیم‌گیری صورت می‌گیرد. هر معیار نشان‌دهنده جنبه‌ای از کیفیت و قابلیت اطمینان سرویس است. تخصیص وزن‌ها بر اساس نیازهای کاربران و اهمیت هر معیار در بهره‌برداری از سرویس انجام می‌شود. مجموع وزن‌ها باید برابر با ۱ باشد. اگر کاربر به یک معیار خاص (مثلاً زمان پاسخ) اهمیتی نداده باشد، وزن این معیار را صفر در نظر می‌گیریم و وزن‌های سایر معیارها را مجدداً تنظیم می‌کنیم تا مجموع آن‌ها برابر با ۱ شود [۷].

- **یکسان‌سازی مقیاس‌ها**

با توجه به اینکه مقیاس‌ها متفاوت هستند (مثلاً زمان پاسخ برحسب میلی‌ثانیه و سایر معیارها به‌صورت درصدی)، نرمال‌سازی مقیاس‌ها ضروری است [۲۸, ۳۹, ۴۸-۵۱].

برای معیارهایی که برحسب درصد (۰ تا ۱) هستند، نیازی به نرمال‌سازی اضافی نیست؛ اما برای زمان پاسخ که برحسب میلی‌ثانیه است، باید نرمال‌سازی انجام شود تا با سایر معیارها هم‌مقیاس شود [۵۲]. برای نرمال‌سازی معیارهایی که مقادیر بالاتر آن‌ها مطلوب‌اند (مانند دسترسی‌پذیری، یکپارچگی داده، تحمل خطا و مقیاس‌پذیری) از فرمول زیر استفاده می‌کنیم:

(۷)

$$\text{مقدار نرمال شده} = \text{مقدار فعلی} - \text{حداقل مقدار} \Big/ \text{حداکثر مقدار} - \text{حداقل مقدار}$$

برای نرمال‌سازی معیارهایی که مقادیر کمتر آن‌ها مطلوب‌اند (مانند زمان پاسخ) از فرمول زیر استفاده می‌کنیم:

(۸)

$$\text{مقدار نرمال شده} = 1 - \text{مقدار فعلی} - \text{حداقل مقدار} \Big/ \text{مقدار حداکثر} - \text{حداقل مقدار}$$

این فرمول تضمین می‌کند که زمان پاسخ کوتاه‌تر، امتیاز بالاتری بگیرد (در بازه ۰ تا ۱).

- **امتیازدهی به درخواست‌ها**

هر درخواست بر اساس معیارهای نرمال‌شده امتیازدهی می‌شود. این امتیازها معمولاً بین ۰ تا ۱ هستند.

- **ترکیب معیارها**

در این مرحله، ما امتیازها و وزن‌های مرتبط با هر سرویس را ترکیب کرده و یک ماتریس ارزیابی کلی (OEM) ایجاد می‌کنیم. OEM بر اساس این عوامل، ارزیابی کلی مرتبط با هر یک از سرویس‌های ابری را ارائه می‌دهد.

عناصر OEM با استفاده از رویکرد میانگین وزن‌دار محاسبه می‌شوند. به‌طور خاص، برای هر گزینه $\boldsymbol{k}$ و معیار $\boldsymbol{i}$، محاسبه شرح زیر است:

$$E_k = \sum_{i=1}^{n}(W_i \times R_i) \Big/ \sum_{i=1}^{n} W_i \qquad (۹)$$

با فرض وجود $\boldsymbol{m}$ گزینه سرویس ابری، در این معادله، $\boldsymbol{n}$ تعداد معیارها است. $\boldsymbol{E_k}$ نمایانگر امتیاز ارزیابی کلی برای گزینه $\boldsymbol{k}$ در OEM است. $\boldsymbol{W_i}$ وزن اختصاص داده‌شده به درخواست یا معیار $\boldsymbol{i}$ برای گزینه $\boldsymbol{k}$ است. این وزن‌ها نسبت به اهمیت نسبی هر درخواست یا معیار مرتبط با گزینه‌ها تعیین می‌شوند. $\boldsymbol{R_i}$ مقدار امتیاز مرتبط با درخواست یا معیار $\boldsymbol{i}$ از گزینه $\boldsymbol{k}$ است. با استفاده از این رویکرد میانگین وزن‌دار، OEM ارزیابی یکپارچه گزینه‌های سرویس‌های ابری را به دست می‌دهد. این رویکرد جامع، انتخاب سرویس‌های ابری را منطبق با درخواست‌های کاربر و ارائه قابلیت اطمینان و عملکرد بهینه صورت می‌بخشد.

$$\boldsymbol{OEM} = \begin{bmatrix} \boldsymbol{E_1} \\ \boldsymbol{E_2} \\ \vdots \\ \boldsymbol{E_m} \end{bmatrix} \qquad (۱۰)$$

۴-۶- مدل زنجیره مارکوف

در مدل زنجیره مارکوف، ماتریس احتمال انتقال (TPM) با استفاده از داده‌های تاریخی یا شبیه‌سازی، محاسبه می‌شود. TPM احتمال انتقال از یک وضعیت قابلیت اطمینان به وضعیت دیگر را برای هر سرویس ابری SaaS نمایش می‌دهد.

همان‌طور که مشاهده می‌شود، عناصر TPM فقط به حالت فعلی سیستم $\mathbf{S(t)}$ بستگی دارند و به زمان (t) بستگی ندارند. این نشان می‌دهد که زنجیره مارکوف همگن است [۵۳, ۵۴].

فرض کنید که 'm' گزینه سرویس‌های ابری از ۱ تا m برچسب‌گذاری شده است. وضعیت سیستم در زمان 't' را با $\mathbf{S(t)}$ نشان می‌دهیم، $\mathbf{S(t)}$ می‌تواند ارزش‌های ۱ تا m را بپذیرد. TPM به شکل زیر تعریف می‌شود:

$$\boldsymbol{TPM} = \begin{bmatrix} \boldsymbol{P(S(t+1)=1|S(t)=1)} & \cdots & \boldsymbol{P(S(t+1)=m|S(t)=1)} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ \boldsymbol{P(S(t+1)=1|S(t)=m)} & \cdots & \boldsymbol{P(S(t+1)=m|S(t)=m)} \end{bmatrix} \qquad (۱۱)$$

عناصر TPM نمایانگر احتمالات انتقال بین حالات هستند. مجموع هر ردیف در TPM باید برابر با ۱ باشد، زیرا سیستم باید به یکی از وضعیت‌ها منتقل شود (الگوریتم ۱) (شکل ۴).

۵-۶- تحلیل پویای سرویس

ارائه‌دهندگان سرویس‌های ابری SaaS باید سرویس‌های باکیفیت ارائه دهند که نیازهای متنوع مشتریان را برآورده کنند تا در بازار رقابتی برتری داشته باشند [۵۵]. برای این منظور، از مشتریان ابری می‌خواهیم که فهرست اولیه‌ای از اولویت‌های نیازهای خود را ارائه دهند. از طرفی، سرویس‌های ابری دارای ویژگی‌های مختلفی ازنظر قابلیت اطمینان هستند که ممکن است در طول زمان تغییر کنند. برای پیگیری این تغییرات می‌توان از زنجیره مارکوف استفاده کرد که به پیش‌بینی الگوهای تغییر در حالات قابلیت اطمینان کمک می‌کند. ویژگی‌های سرویس‌ها معمولاً در طول زمان تغییر می‌کنند، بنابراین پیش‌بینی این تغییرات برای انتخاب و رتبه‌بندی سرویس‌های SaaS مناسب ضروری است [۴۷, ۵۶, ۵۷].

برای این کار، با استفاده از ماتریس انتقال احتمال در مدلOEM ، می‌توانیم بردار احتمال حالت ثابت (SSPV) را محاسبه کنیم. SSPV نشان‌دهنده احتمالات درازمدت مرتبط با باقی ماندن در هر حالت است. برای به دست آوردنSSPV، معادله زیر را حل می‌کنیم:

$$SSPV = SSPV \times TPM \qquad (۱۲)$$

بااین‌حال، برای ابعاد بزرگ ماتریس انتقال احتمال، محاسبه مستقیم SSPV دشوار است و ممکن است گلوگاه محاسباتی ایجاد کند. برای برطرف کردن این مشکل، از روش توانی[1] استفاده می‌شود. روش توانی یکی از الگوریتم‌های تکراری است که به‌طور گسترده برای محاسبه بردارهای ویژه غالب ماتریس‌ها استفاده می‌شود و برای این کاربرد خاص بسیار مناسب است [۵۸, ۵۹]. درروش توانی، بردار احتمال حالت ثابت به‌صورت تکراری و در چندین گام محاسبه می‌شود:

$$\boldsymbol{SSPV^{(k+1)}} = \frac{\boldsymbol{SSPV^{(k)} \times TPM}}{\|\boldsymbol{SSPV^{(k)} \times TPM}\|} \qquad (۱۳)$$

این فرآیند تا زمانی که SSPV تقریباً تغییر نکند (یعنی همگرا شود) تکرار می‌شود. استفاده از این روش تکراری به کاهش پیچیدگی محاسباتی کمک می‌کند و باعث می‌شود تا بتوانیم به‌طور مؤثرتری بردار احتمال حالت ثابت را برای سامانه‌های بزرگ محاسبه کنیم. مزیت اصلی این روش در سادگی و کارایی آن برای ماتریس‌های بزرگ است که در کاربردهای ابری به‌شدت موردنیاز است [۶۰-۶۲].

۶-۶- الگوریتم تصمیم‌گیری

با توجه به اطلاعات به‌دست‌آمده از مراحل قبلی، الگوریتم تصمیم‌گیری به‌منظور انتخاب مناسب‌ترین سرویس‌های ابری SaaS طراحی می‌شود. الگوریتم، ملاحظاتی از قبیل درخواست‌های کاربر، معیارهای قابلیت اطمینان، احتمالات حالت ثابت و هر معیار مرتبط دیگر را در نظر می‌گیرد.

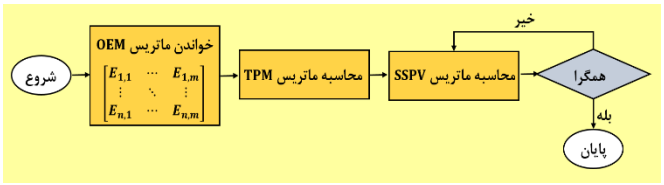
۷-۶- رتبه‌بندی و انتخاب سرویس

با استفاده از الگوریتم تصمیم‌گیری، گزینه‌های سرویس‌های ابری SaaS بر اساس ارزیابی کلی، احتمالات حالت ثابت و معیارهای دیگر، رتبه‌بندی و انتخاب می‌شوند. گزینه‌های با رتبه بالاتر به‌عنوان گزینه‌های توصیه‌شده برای انتخاب سرویس‌های ابری در نظر گرفته می‌شوند.

[1] Power Method

الگوریتم ۱- شبه کدی برای مدل زنجیره مارکوف

```
function calculateTransitionProbabilityMatrix(OEM):
  // Inputs:
  // OEM: Overall Evaluation Matrix
  // Outputs:
  // TPM: Transition Probability Matrix
  n = number of cloud service components
  TPM = empty matrix of size n x n
  for i = 1 to n:
    rowSum = sum of elements in OEM's ith row
    for j = 1 to n:
      TPM[i][j] = OEM[i][j] / rowSum
  return TPM
function calculateSteadyStateProbabilityVector(TPM):
  // Inputs:
  // TPM: Transition Probability Matrix
  // Outputs:
  // SSPV: Steady-State Probability Vector
  n = number of cloud service components
  initialSSPV = [1/n, 1/n, ..., 1/n] // initialize SSPV with equal probabilities
  while true:
    updatedSSPV = initialSSPV × TPM // matrix multiplication
    if convergence criteria are met: // e.g., change in SSPV below a threshold
      break
    initialSSPV = updatedSSPV
  return updatedSSPV
// Example usage
OEM = input Overall Evaluation Matrix
TPM = calculateTransitionProbabilityMatrix(OEM)
SSPV = calculateSteadyStateProbabilityVector(TPM)
// Output SSPV
```



شکل ۴- یک نمودار شماتیک برای روش REMSS

۷- مطالعه موردی

سناریویی را در نظر بگیریم که در آن ۱۰ گزینه سرویس ابری SaaS و ۵ معیار ارزیابی وجود دارد. هدف، ارزیابی و انتخاب سرویس‌های ابری SaaS بر اساس درخواست‌های کاربر و معیارهای ارزیابی است.

در این مطالعه موردی، شاخص سرویس‌های SaaS با استفاده از داده‌های مربوط به قابلیت اطمینان ده سرویس ابری واقعی محاسبه‌شده است. داده‌های قابلیت اطمینان از مطالعات مختلف ارزیابی برای ده سرویس SaaS جمع‌آوری‌شده‌اند که عبارت‌اند از: Salesforce، Microsoft Dynamics 365، Zoho CRM، HubSpot CRM، Oracle CRM، Freshsales، Pipedrive، SAP CRM، SugarCRM و Insightly [۴۵, ۴۶, ۶۸-۶۳]. برای داده‌های ناقص، مقادیر به‌صورت تصادفی به هر سرویس ابری تخصیص داده‌شده‌اند. وزن‌های کاربر نیز به‌صورت تصادفی به هر ویژگی مرتبط باقابلیت اطمینان SaaS اختصاص داده‌شده‌اند. گروه‌های اصلی قابلیت اطمینان شامل دسترسی‌پذیری، زمان پاسخ، یکپارچگی داده، تحمل خطا و مقیاس‌پذیری هستند [۶, ۴۵, ۴۶, ۶۹, ۷۰].

در ادامه، مراحل محاسبه رتبه‌بندی برای این سرویس‌های ابری به‌تفصیل شرح داده می‌شود.

مرحله ۱: در این مرحله، درخواست‌های کاربر را جمع‌آوری می‌کنیم و عملیات تخصیص وزن را برای نمایش اهمیت نسبی آن‌ها انجام می‌دهیم. فرض کنید درخواست‌ها و وزن‌ها مطابق جدول ۱ است.

جدول ۱- درخواست‌ها و وزن‌ها برای ارزیابی سرویس‌های ابری

درخواست‌ها	وزن
یکپارچگی داده	۰.۳
تحمل خطا	۰.۴
مقیاس‌پذیری	۰.۳

مرحله ۲: در این مرحله، پنج معیار اصلی برای ارزیابی گزینه‌های سرویس‌های ابری SaaS تعیین می‌شوند. این معیارها عبارت‌اند از: دسترسی‌پذیری، زمان پاسخ، یکپارچگی داده، تحمل خطا و مقیاس‌پذیری. فرض می‌شود که معیارها و مقادیر مربوط به هر گزینه در جدول ۲ ارائه‌شده است. برای سهولت، فرض شده که معیارهای زمان پاسخ و دسترسی‌پذیری از دید کاربران اهمیت چندانی ندارند؛ بنابراین، وزن آن‌ها طبق توضیحات بخش ۶-۳ (یکپارچه‌سازی معیارها) صفر در نظر گرفته‌شده است. همچنین، سایر معیارهای ذکرشده در جدول ۲ از پیش نرمال‌سازی شده‌اند و نیازی به یکسان‌سازی مقیاس‌ها وجود ندارد.

جدول ۲- معیارهای قابلیت اطمینان برای سرویس‌های ابری

شماره سرویس	دسترسی‌پذیری (%)	زمان پاسخ (ms)	یکپارچگی داده (%)	تحمل خطا (%)	مقیاس‌پذیری (%)
۱	۹۹.۹	۲۵۰	۹۹.۸	۹۹.۷	۹۰
۲	۹۹.۵	۳۰۰	۹۹.۵	۹۹.۵	۸۰
۳	۹۹.۸	۲۰۰	۹۹.۹	۹۹.۹	۹۵
۴	۹۹.۷	۳۵۰	۹۹.۷	۹۹.۶	۸۵
۵	۹۹.۹	۱۵۰	۹۹.۸	۹۹.۷	۹۲
۶	۹۹.۵	۴۰۰	۹۹.۶	۹۹.۵	۷۸
۷	۹۹.۶	۲۵۰	۹۹.۹	۹۹.۸	۸۸
۸	۹۹.۷	۳۰۰	۹۹.۷	۹۹.۶	۸۵
۹	۹۹.۸	۲۰۰	۹۹.۹	۹۹.۹	۹۰
۱۰	۹۹.۹	۱۵۰	۹۹.۸	۹۹.۷	۹۵

مرحله ۳: در این مرحله، برای ارزیابی عملکرد کلی هر یک از سرویس‌های ابری SaaS، میانگین وزن‌دار معیارهای قابلیت اطمینان را بر اساس اهمیت آن‌ها با استفاده از معادلات ۱۰ و ۱۱ محاسبه می‌کنیم. با استفاده از وزن‌هایی که در مرحله ۱ به دست آوردیم و مقادیری که در مرحله ۲ داریم، می‌توانیم امتیاز ارزیابی کلی را محاسبه کنیم (جدول ۳).

جدول ۳- ماتریس ارزیابی کلی

شماره سرویس	امتیاز ارزیابی کلی

۱	۹۷.۲۱
۲	۹۴.۶۶
۳	۹۸.۵۶
۴	۹۵.۳۷
۵	۹۶.۷۴
۶	۹۲.۷۴
۷	۹۶.۹۰
۸	۹۵.۹۶
۹	۹۷.۳۹
۱۰	۹۸.۱۱

مرحله ۴: در این مرحله، از مدل زنجیره مارکوف برای تحلیل احتمال انتقال بین حالت‌های مختلف قابلیت اطمینان مرتبط با هر یک از گزینه‌های سرویس‌های ابری SaaS استفاده می‌کنیم. سه حالت قابلیت اطمینان شامل زیاد، متوسط و کم را بر اساس معادله ۱۱ در نظر گرفته و احتمال انتقال بین حالت‌ها را برای هر یک از گزینه‌ها مطابق جدول ۴ در نظر می‌گیریم.

جدول ۴- احتمالات انتقال برای مدل زنجیره مارکوف

شماره سرویس	زیاد به زیاد	زیاد به متوسط	زیاد به کم	متوسط به زیاد	متوسط متوسط	متوسط به کم	کم به زیاد	کم به متوسط	کم به کم
۱	۰.۸۰	۰.۱۰	۰.۱۰	۰.۳۰	۰.۵۰	۰.۲۰	۰.۱۰	۰.۲۰	۰.۷۰
۲	۰.۷۰	۰.۲۰	۰.۱۰	۰.۴۰	۰.۴۰	۰.۲۰	۰.۲۰	۰.۳۰	۰.۵۰
۳	۰.۹۰	۰.۰۵	۰.۰۵	۰.۲۰	۰.۷۰	۰.۱۰	۰.۰۸	۰.۱۰	۰.۸۵
۴	۰.۸۰	۰.۱۰	۰.۱۰	۰.۳۰	۰.۵۰	۰.۲۰	۰.۱۰	۰.۲۰	۰.۷۰
۵	۰.۹۰	۰.۰۵	۰.۰۵	۰.۲۰	۰.۷۰	۰.۱۰	۰.۰۵	۰.۱۰	۰.۸۵
۶	۰.۷۰	۰.۲۰	۰.۱۰	۰.۴۰	۰.۴۰	۰.۲۰	۰.۲۰	۰.۳۰	۰.۵۰
۷	۰.۸۰	۰.۱۰	۰.۱۰	۰.۳۰	۰.۵۰	۰.۲۰	۰.۱۰	۰.۲۰	۰.۷۰
۸	۰.۸۰	۰.۱۰	۰.۱۰	۰.۳۰	۰.۵۰	۰.۲۰	۰.۱۰	۰.۲۰	۰.۷۰
۹	۰.۹۰	۰.۰۵	۰.۰۵	۰.۲۰	۰.۷۰	۰.۱۰	۰.۰۵	۰.۱۰	۰.۸۵
۱۰	۰.۹۰	۰.۰۵	۰.۰۵	۰.۲۰	۰.۷۰	۰.۱۰	۰.۰۵	۰.۱۰	۰.۸۵

مرحله ۵: در این مرحله، با استفاده از مدل زنجیره مارکوف، عملکرد درازمدت هر یک از گزینه‌های سرویس ابری SaaS را تحلیل می‌کنیم. با استفاده از فرمول ۱۲، احتمالات حالت پایدار را برای ارزیابی هر یک از گزینه‌ها محاسبه می‌کنیم. احتمالات حالت پایدار نشان‌دهنده توزیع درازمدت گزینه‌ها در حالت‌های مختلف قابلیت اطمینان است. احتمالات حالت پایدار را با استفاده از احتمالات انتقال از مرحله ۴ محاسبه می‌کنیم.

جدول ۵- احتمالات پایدار برای سرویس‌های ابری

شماره سرویس	حالت زیاد (%)	حالت متوسط (%)	حالت کم (%)
۱	۴۸.۸۹	۲۸.۸۹	۲۲.۲۲
۲	۵۲.۹۴	۲۶.۴۷	۲۰.۵۹
۳	۵۷.۱۴	۲۶.۱۹	۱۶.۶۷
۴	۴۸.۸۹	۲۸.۸۹	۲۲.۲۲
۵	۵۷.۱۴	۲۶.۱۹	۱۶.۶۷
۶	۵۲.۹۴	۲۶.۴۷	۲۰.۵۹
۷	۴۸.۸۹	۲۸.۸۹	۲۲.۲۲
۸	۴۸.۸۹	۲۸.۸۹	۲۲.۲۲
۹	۵۷.۱۴	۲۶.۱۹	۱۶.۶۷
۱۰	۵۷.۱۴	۲۶.۱۹	۱۶.۶۷

مرحله ۶: در این مرحله، برای محاسبه ارزیابی وزن‌دار هر یک از گزینه‌ها، ابتدا باید مقادیر ماتریس ارزیابی کلی (جدول ۳) را در مقادیر مربوط به حالت زیاد از جدول ۵ که نشان‌دهنده احتمالات حالت پایدار هستند، ضرب کنیم. این محاسبه منجر به دست آمدن ارزیابی وزن‌دار برای هر گزینه خواهد شد که نتایج آن در جدول ۶ و شکل ۵ ارائه‌شده است. این ارزیابی وزن‌دار به ما کمک می‌کند تا گزینه‌های مختلف را بر اساس معیارهای تعیین‌شده، به‌دقت مقایسه و مناسب‌ترین گزینه‌ها را شناسایی کنیم. در این مطالعه موردی، گزینه‌های ۳ و ۱۰ با کسب بالاترین امتیازها به‌عنوان مناسب‌ترین گزینه‌ها انتخاب شدند.

جدول ۶- ماتریس ارزیابی وزن‌دار

شماره سرویس	ارزیابی وزن‌دار
۱	۴۷.۵۲
۲	۵۰.۱۱
۳	۵۶.۳۲
۴	۴۶.۶۳

۵	۵۵.۲۸
۶	۴۹.۱۰
۷	۴۷.۳۷
۸	۴۶.۹۱
۹	۵۵.۶۵
۱۰	۵۶.۰۶

شکل ۵- ارزیابی سرویس‌های ابری با روش REMSS

۸- نتایج شبیه‌سازی و پیاده‌سازی

روش پیشنهادی REMSS برای انتخاب سرویس‌های ابری SaaS بر روی پلتفرم MyEclipse Professional 2014 و با استفاده از بسته شبیه‌سازی یکپارچه Cloudsim 3.0.3 مورد تجزیه‌وتحلیل و پیاده‌سازی قرارگرفته است. این تجزیه‌وتحلیل در محیط سخت‌افزاری شامل پردازنده i7-3770 با فرکانس ۳.۴ گیگاهرتز و ۸ گیگابایت رم انجام‌شده است [۵۲, ۷۱-۷۴]. همچنین، REMSS بر اساس مطالعه موردی بخش ۷ ارزیابی شد که نتایج نشان‌دهنده بهبود عملکرد این روش در مقایسه با روش‌های دیگر است.

۸-۱- تحلیل مطابقت رتبه

در این بخش، به تحلیل و ارزیابی روش پیشنهادی در مقایسه با دو روش تحلیل سلسله‌مراتبی و بهترین-بدترین[1] از جنبه مطابقت رتبه پرداخته می‌شود.

فرآیند تحلیل سلسله‌مراتبی: یک روش تصمیم‌گیری چندمعیاره است. این روش از یک ساختار سلسله‌مراتبی برای تجزیه‌وتحلیل مسئله استفاده می‌کند و شامل مقایسات زوجی بین معیارها و گزینه‌ها است. فرآیند تحلیل سلسله‌مراتبی با محاسبه وزن‌های نسبی معیارها و گزینه‌ها به تصمیم‌گیرنده کمک می‌کند تا بهترین گزینه را انتخاب کند [۶].

روش بهترین-بدترین: یک روش تصمیم‌گیری چندمعیاره است. در این روش، تصمیم‌گیرنده بهترین و بدترین معیارها را انتخاب کرده و مقایسات زوجی بین این معیارها و دیگر معیارها انجام می‌شود. سپس، وزن‌های نسبی معیارها با حل یک مدل بهینه‌سازی به دست می‌آید. بهترین-بدترین به دلیل نیاز به مقایسات کمتر نسبت به فرآیند تحلیل سلسله‌مراتبی، پیچیدگی محاسباتی کمتری دارد [۵۷].

برای انجام تحلیل مطابقت رتبه‌ای، نتایج به‌دست‌آمده از روش پیشنهادی (مراحل ۱ تا ۶) را با دو روش شناخته‌شده دیگر، به نام‌های روش تحلیل سلسله‌مراتبی و روش بهترین-بدترین مقایسه می‌کنیم (شکل ۶). در ارزیابی‌های فرآیند تحلیل سلسله‌مراتبی و بهترین-بدترین، مقادیر بالاتر به معنی قابلیت اطمینان بیشتر است. با مقایسه می‌توان مشاهده کرد که رتبه‌بندی گزینه‌ها درروش پیشنهادی و دو روش دیگر، تفاوت‌هایی دارد. مشاهده‌های کلیدی عبارت‌اند از:

- **فرآیند تحلیل سلسله‌مراتبی:** گزینه ۳ به‌طور پیوسته در تمام روش‌ها به‌عنوان بهترین گزینه رتبه‌بندی می‌شود که نشان‌دهنده قابلیت اطمینان بالای آن است.
- **بهترین-بدترین:** گزینه ۳ به‌عنوان بهترین گزینه رتبه‌بندی می‌شود و رتبه‌بندی سایر گزینه‌ها نسبت به روش‌های دیگر با یکدیگر متفاوت است.

این تفاوت‌ها در رتبه‌بندی، حساسیت نتایج به روش انتخابی را نشان می‌دهند. هر روش، رویکرد و فرضیات خود را دارد که می‌تواند منجر به تغییراتی در رتبه‌بندی شود. بسته به درخواست‌ها و ترجیحات خاص تصمیم‌گیرنده، انتخاب گزینه‌های سرویس‌های ابری قابل‌اطمینان‌تر ممکن است متفاوت باشد. بررسی‌های بیشتر ممکن است برای تعیین مناسب‌ترین روش و هماهنگی آن با اولویت‌های تصمیم‌گیرنده لازم باشد. در نظر داشته باشیم که روش بهترین-بدترین به‌تازگی معرفی‌شده است و نسبت به فرآیند تحلیل سلسله‌مراتبی با در نظر گرفتن هر دو بهترین و بدترین گزینه، دیدگاهی متفاوت را در نظر می‌گیرد و به ارزیابی جامع‌تری می‌انجامد. رتبه‌بندی‌های روش بهترین-بدترین نشان می‌دهد که عملکرد نسبی گزینه‌ها بر اساس نزدیکی آن‌ها بهترین و بدترین گزینه‌ها است. در مورد داده‌های داده‌شده، گزینه ۳ به‌طور پیوسته در تمام روش‌ها به‌عنوان بهترین گزینه رتبه‌بندی می‌شود که نشان‌دهنده قابلیت اطمینان بالای آن نسبت به سایر گزینه‌ها است. گزینه ۱۰ نیز در بیشتر روش‌ها عملکرد خوبی دارد که نشانگر قدرت آن است. بااین‌حال، در رتبه‌بندی سایر گزینه‌ها تفاوت‌هایی وجود دارد که نشان‌دهنده تأثیر روش‌های مختلف بر تصمیم نهایی است.

۸-۲- ارزیابی بر اساس انحراف از معیار

این بخش‌بر اساس انحراف معیار به ارزیابی و مقایسه روش پیشنهادی پرداخته است. انحراف معیار نشان‌دهنده میزان پراکندگی داده‌ها از میانگین است. انحراف معیار کمتر نشان‌دهنده پایداری بیشتر و نوسانات کمتر در رتبه‌بندی‌ها است.

برای محاسبه انحراف معیار، از فرمول زیر استفاده می‌کنیم:

$$\sigma = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^{N}(x_i-\mu)^2}{n}} \qquad (۱۴)$$

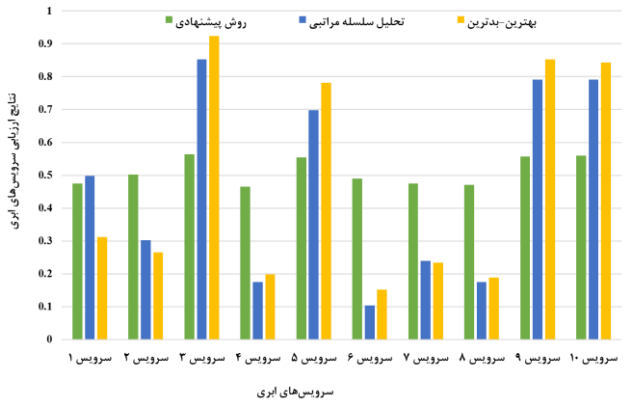
که در آن: σ انحراف معیار، x_i مقدار هر داده، μ میانگین مقادیر و n تعداد داده‌ها است. نتایج محاسبات انحراف معیار برای روش پیشنهادی، روش سلسله‌مراتبی و روش بهترین-بدترین بر اساس داده‌های نمودار شکل ۶، به ترتیب برابر است با ۰.۰۳۲، ۰.۲۶۳ و ۰.۲۷۱. روش پیشنهادی دارای کمترین انحراف معیار است که نشان‌دهنده پایداری و دقت بالاتر در رتبه‌بندی سرویس‌های ابری نسبت به دو روش دیگر است.

برای ارزیابی درصد بهبود عملکرد روش پیشنهادی نسبت به روش‌های دیگر بر اساس انحراف معیار، درصد بهبود به‌صورت زیر محاسبه می‌شود:

$$\left(\frac{\text{مقدار روش دیگر} - \text{مقدار روش پیشنهادی}}{\text{مقدار روش دیگر}}\right) \times ۱۰۰ \qquad (۱۵)$$

[1] BWM (Best Worst Method)

روش پیشنهادی با داشتن انحراف معیار کمتر، نشان‌دهنده پایداری و دقت بیشتری در رتبه‌بندی سرویس‌های ابری است. درصد بهبود عملکرد روش پیشنهادی نسبت به روش تحلیل سلسله‌مراتبی حدود ۸۷.۷٪ و نسبت به روش بهترین-بدترین حدود ۸۸٪ است. این نتایج نشان می‌دهد که روش پیشنهادی به‌طور قابل‌توجهی پایداری و دقت بیشتری نسبت به دو روش دیگر دارد و می‌تواند به‌عنوان یک ابزار مؤثر برای رتبه‌بندی سرویس‌های ابری مورداستفاده قرار گیرد.



شکل ۶- مقایسه روش‌های مختلف رتبه‌بندی سرویس‌های ابری

۸-۳- ارزیابی بر اساس پیچیدگی زمانی

روش پیشنهادی پیچیدگی زمانی نسبتاً کمی در مقایسه با سایر روش‌ها دارد. بیشتر مراحل دارای پیچیدگی زمانی خطی $O(n)$ هستند که در آن n تعداد گزینه‌ها است. مراحل یکپارچه‌سازی معیارها و مدل زنجیره مارکوف دارای پیچیدگی زمانی $O(n * m)$ هستند که در آن m تعداد معیارها است.

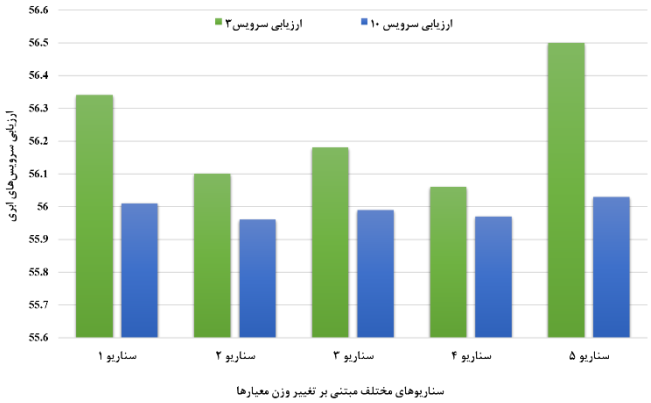
• فرآیند تحلیل سلسله‌مراتبی: پیچیدگی زمانی فرآیند تحلیل سلسله‌مراتبی مرتبط با سلسله‌مراتب تصمیم و تعداد مقایسات دوبه‌دو است و معمولاً منجر به پیچیدگی زمانی $O(n^3)$ می‌شود.

• روش بهترین-بدترین: پیچیدگی زمانی روش بهترین-بدترین برابر با $O(n^2)$ است زیرا شامل مقایسه‌های دوبه‌دو و تعیین بهترین و بدترین معیارها است.

به‌طور مقایسه‌ای، روش پیشنهادی دارای پیچیدگی زمانی نسبتاً کمتری نسبت به فرآیند تحلیل سلسله‌مراتبی و روش بهترین-بدترین است. این روش رویکردی کارآمد برای ارزیابی قابلیت اطمینان گزینه‌های سرویس‌های ابری، به‌خصوص برای مسائل کوچک‌تر، ارائه می‌دهد. بااین‌حال، برای مسائل بزرگ‌تر و پیچیده‌تر، روش‌های دیگر ممکن است با استفاده از فنون پیشرفته‌تر با پیچیدگی زمانی بالاتر ارائه شوند. انتخاب روش به عواملی مانند مقیاس مسئله، پیچیدگی و تعادل بین کارایی محاسباتی و دقت بستگی دارد.

۸-۴- تحلیل حساسیت-سطح اول: تغییر وزن معیارها

در اولین سطح از تحلیل حساسیت روش پیشنهادی بر اساس مطالعه موردی، ما وزن‌های اختصاص داده‌شده به درخواست‌ها را تغییر داده و تأثیر آن‌ها بر ارزیابی وزن‌دار گزینه‌های سرویس‌های ابری را مشاهده خواهیم کرد. در ادامه نموداری را ارائه می‌دهیم که نتایج تحلیل حساسیت را ارائه می‌کند (شکل ۷):



شکل ۷- نتیجه تحلیل حساسیت سطح اول برای روش REMSS

در هر سناریو، ما وزن‌های اختصاص داده‌شده به درخواست‌ها را تغییر می‌دهیم، درحالی‌که مجموع وزن‌ها ثابت باقی می‌ماند (۰.۴ + ۰.۳ + ۰.۲ + ۰.۱ = ۱). شکل ۶ نمرات ارزیابی وزن‌دار برای گزینه ۳ و گزینه ۱۰ بر اساس وزن‌های تنظیم‌شده را نشان می‌دهد. مشاهدات کلیدی از تحلیل حساسیت:

• در سناریو ۱ که وزن‌های اصلی مطالعه موردی را منعکس می‌کند، گزینه ۳ با نمره ارزیابی وزن‌دار بالاتری به مقدار ۵۶.۳۴، نشان‌دهنده قابلیت اطمینان بیشتر آن با توجه به وزن‌های اختصاص داده‌شده است.

• سناریو ۲ تأثیر افزایش وزن مقیاس‌پذیری و کاهش وزن عملکرد را نشان می‌دهد. بااین‌حال، گزینه ۳ هنوز هم با نمره ارزیابی وزن‌دار بالاتری مقابله می‌کند، اما کاهش کمی در ارزیابی وزن‌دار آن وجود دارد.

• سناریو ۳ تأثیر افزایش وزن عملکرد و کاهش وزن امنیت را نشان می‌دهد. گزینه ۳ موقعیت خود به‌عنوان گزینه‌ای قابل‌اطمینان را حفظ می‌کند، اما کاهش کمی در نمره ارزیابی وزن‌دار آن وجود دارد.

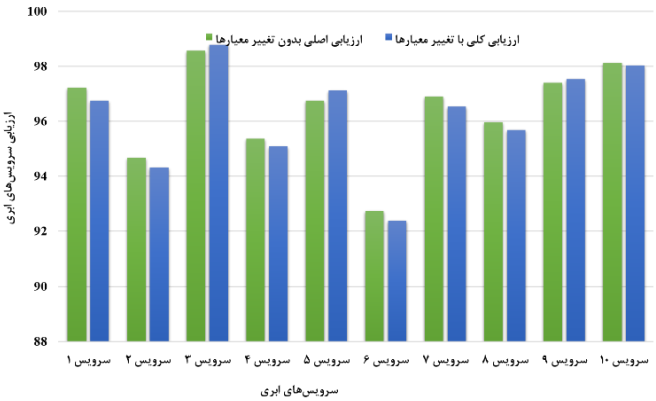
• سناریو ۴ بر تأثیر افزایش چشمگیر عملکرد و کاهش وزن قابلیت اطمینان تمرکز دارد. به همین دلیل، هر دو گزینه ۳ و ۱۰ با کاهش نمره ارزیابی وزن‌دار مواجه می‌شوند. بااین‌حال، گزینه ۳ همچنان نمره بالاتری نسبت به گزینه ۱۰ دارد.

• سناریو ۵ تأثیر افزایش وزن قابلیت اطمینان و کاهش وزن عملکرد را موردبررسی قرار می‌دهد. نمره ارزیابی وزن‌دار هر دو گزینه بهبود می‌یابد و گزینه ۳ همچنان گزینه قابل‌اطمینانی است.

تحلیل حساسیت نشان می‌دهد که روش پیشنهادی حساس به تغییرات در وزن‌های اختصاص داده‌شده به درخواست‌ها است. با تنظیم وزن‌ها، تصمیم‌گیرندگان می‌توانند بر ارزیابی وزن‌دار و رتبه‌بندی گزینه‌های سرویس‌های ابری تأثیر بگذارند. این تحلیل، تصمیم‌گیرندگان را قادر می‌سازد تا تأثیر تغییرات وزن‌ها را بررسی کنند و بر اساس اولویت‌ها و ترجیحات خود انتخاب‌های آگاهانه انجام دهند (شکل ۷).

۸-۵- تحلیل حساسیت-سطح دوم: تغییر معیارها

برای انجام تحلیل حساسیت در سطح دوم برای روش پیشنهادی، ما معیارهای قابلیت اطمینان اختصاص داده‌شده به گزینه‌های سرویس‌های ابری را تغییر می‌دهیم و تأثیر آن‌ها را بر نمرات ارزیابی کلی مشاهده خواهیم کرد. در ادامه نموداری جامع را ارائه می‌دهیم که نتایج تحلیل حساسیت را خلاصه می‌کند (شکل ۸).



شکل ۸- نتیجه تحلیل حساسیت سطح دوم برای روش REMSS

در این تحلیل حساسیت، نمرات ارزیابی کلی گزینه‌های سرویس‌های ابری SaaS بر اساس معیارهای قابلیت اطمینان اصلی و معیارهای تغییریافته مقایسه می‌شوند. از تغییرات در دسترسی‌پذیری، زمان پاسخ، یکپارچگی داده، تحمل خطا و قابلیت مقیاس‌پذیری گزینه‌ها استفاده می‌کنیم درحالی‌که وزن‌ها و سایر عوامل ثابت باقی می‌ماند. مشاهدات کلیدی از تحلیل حساسیت:

• نمرات ارزیابی کلی اصلی بر اساس معیارهای قابلیت اطمینان ارائه‌شده محاسبه‌شده است که منجر به نمره بالاتر گزینه ۳ (۹۸.۵۶) و گزینه ۱۰ (۹۸.۱۱) می‌شود که نشان‌دهنده قابلیت اطمینان بالای آن‌ها است.

• هنگامی‌که معیارهای قابلیت اطمینان را تغییر می‌دهیم، می‌توانیم تغییراتی در نمرات ارزیابی کلی هر گزینه مشاهده کنیم. به‌عنوان‌مثال، تغییر در دسترسی‌پذیری، زمان پاسخ یا قابلیت مقیاس‌پذیری ممکن است منجر به تغییراتی کوچک در نمرات ارزیابی کلی شود.

• به‌طور قابل‌توجهی، گزینه ۵ هنگام کاهش زمان پاسخ از ۱۵۰ میلی‌ثانیه به ۱۰۰ میلی‌ثانیه، بهبود قابلیت اطمینان خود را نشان می‌دهد.

• به‌طور مشابه، گزینه ۹ نمره ارزیابی کلی بالاتری دارد هنگامی‌که قابلیت مقیاس‌پذیری آن از ۹۰٪ به ۹۵٪ افزایش می‌یابد که نشان‌دهنده بهبود قابلیت اطمینان آن است.

• از طرف دیگر، برخی تغییرات در معیارهای قابلیت اطمینان ممکن است منجر به کاهش نمرات ارزیابی کلی شوند. به‌عنوان‌مثال، افزایش زمان پاسخ گزینه ۲ از ۳۰۰ میلی‌ثانیه به ۴۰۰ میلی‌ثانیه منجر به کاهش نمره ارزیابی کلی آن از ۹۴.۶۶ به ۹۴.۳۲ می‌شود. در کل، تحلیل حساسیت به ما کمک می‌کند تا درک کنیم چگونه تغییرات در معیارهای خاص قابلیت اطمینان می‌تواند بر ارزیابی کلی گزینه‌های سرویس‌های ابری تأثیر بگذارد. این به ما امکان می‌دهد تا عوامل حیاتی را که بر قابلیت اطمینان تأثیر قابل‌توجهی دارند شناسایی کرده و بر اساس سطح موردنظر عملکرد، تصمیم‌گیری آگاهانه انجام دهیم. با انجام تحلیل حساسیت، به درک قدرت روش پیشنهادی و توانایی آن در سازگاری با تغییرات در معیارهای قابلیت اطمینان می‌رسیم. این تحلیل به درک حساسیت فرایند ارزیابی کمک می‌کند و اطلاعات ارزشمندی را برای تصمیم‌گیری و بهینه‌سازی انتخاب سرویس‌های ابری فراهم می‌کند (شکل ۸).

۸-۶- تطابق با تغییر گزینه‌ها

تحلیل مطالعه موردی نشان می‌دهد که روش پیشنهادی با تغییر گزینه‌ها مطابقت دارد. در اینجا عوامل کلیدی زیر را باید مدنظر قرار دهیم:

• **انعطاف‌پذیری:** روش پیشنهادی امکان ادغام آسان گزینه‌های سرویس‌های ابری جدید را فراهم می‌کند. گزینه‌های جدید با معیارهای قابلیت اطمینان مشابه طور ساده می‌توانند در فرآیند ارزیابی یکپارچه شوند. این انعطاف‌پذیری روش را قادر می‌سازد که با تغییرات در گزینه‌های سرویس‌های ابری موجود سازگار باشد.

• **قابلیت مقیاس‌پذیری:** روش قادر است با تغییر تعداد گزینه‌ها بدون تغییرات قابل‌توجه ارزیابی‌ها سازگاری پیدا کند. بدون توجه به اینکه تعداد گزینه‌ها ۱۰ یا ۱۰۰ باشد، مراحل مربوط به اجرای روش یکسان باقی می‌ماند.

• **ارزیابی منسجم:** روش، ارزیابی منسجم را در میان گزینه‌های مختلف تضمین می‌کند. با استفاده از فرآیند ساختارمندی که وزن‌ها، معیارها و ماتریس‌های ارزیابی را ترکیب می‌کند، روشی استاندارد برای ارزیابی قابلیت اطمینان را فراهم می‌کند. این پیوستگی، مقایسه‌های منصفانه و تصمیم‌گیری قابل‌اطمینان را بدون توجه به تعداد گزینه‌ها تضمین می‌کند.

• **تحلیل مقایسه‌ای:** روش پیشنهادی، تحلیل مقایسه‌ای بین گزینه‌ها را پشتیبانی می‌کند. با استفاده از ادغام معیارها و محاسبه نمرات ارزیابی کلی، مکانیسم مناسبی برای مقایسه قابلیت اطمینان گزینه‌های مختلف فراهم می‌کند. این تحلیل مقایسه‌ای بدون توجه به تعداد گزینه‌ها، معتبر و معنی‌دار است.

۸-۷- ارزیابی کلی

در این بخش، ما نتایج استفاده از روش پیشنهادی را که تاکنون به‌صورت پراکنده در مقایسه با دو روش متداول دیگر، یعنی فرآیند تحلیل سلسله‌مراتبی و بهترین-بدترین، اشاره‌کرده‌ایم، با دقت و کامل بررسی نموده‌ایم. در جدول ۷، نتایج این مقایسه‌ها ارائه‌شده است.

جدول ۷- مقایسه روش پیشنهادی با فرآیند تحلیل سلسله‌مراتبی و روش بهترین-بدترین [۶، ۵۷]

معیارها	روش پیشنهادی	فرآیند تحلیل سلسله‌مراتبی	روش بهترین-بدترین
قابلیت اطمینان	استفاده از معیارهای مختلف برای درک جامع قابلیت اطمینان	بر مبنای مقایسات دوبه‌دو معیارها	تعیین بهترین و بدترین معیارها و مقایسه دوبه‌دو
مدل زنجیره مارکوف	استفاده از مدل زنجیره مارکوف برای نمایش پویایی و احتمالات انتقال سرویس‌ها	استفاده نمی‌شود	استفاده نمی‌شود
سازگاری راه‌حل‌ها	ارائه راه‌حل‌های قابل‌اطمینان و کاهش انتخاب سرویس‌های ناقص	ممکن است به دلیل پیچیدگی کمتر دقیق باشد	وابسته به‌دقت تعیین معیارهای بهترین و بدترین
کارایی و رضایت کاربران	بهبود انتخاب سرویس‌ها و افزایش رضایت کاربران	بستگی به‌دقت مقایسات و وزن دهی دارد	بستگی به‌دقت مقایسات و تعیین معیارها دارد
پیچیدگی زمانی	$O(n)$ و $O(n*m)$	$o(n^3)$	$o(n^2)$
انعطاف‌پذیری	امکان ادغام آسان گزینه‌های جدید	محدود به سلسله‌مراتب ثابت	نیاز به تنظیمات مجدد برای تعیین بهترین و بدترین معیارها
قابلیت مقیاس‌پذیری	سازگاری با تغییر تعداد گزینه‌ها بدون تغییرات عمده	افزایش تعداد معیارها پیچیدگی را افزایش می‌دهد	افزایش تعداد معیارها پیچیدگی را افزایش می‌دهد

ارزیابی منسجم	تضمین ارزیابی منسجم با استفاده از معیارها و ماتریس‌های ارزیابی	بستگی به ثبات وزن دهی و مقایسات دارد	بستگی به‌دقت تعیین معیارها دارد
تحلیل مقایسه‌ای	پشتیبانی از تحلیل مقایسه‌ای بین گزینه‌ها	بستگی به‌دقت وزن دهی و مقایسات دارد	بستگی به‌دقت تعیین معیارها دارد
انحراف معیار	انحراف معیار کمتر (پایداری بالاتر): ۸۷.۷٪ کمتر از فرآیند تحلیل سلسله‌مراتبی و ۸۸٪ کمتر از روش بهترین-بدترین	انحراف معیار بیشتر و نوسانات بیشتر در رتبه‌بندی	انحراف معیار بیشتر و نوسانات بیشتر در رتبه‌بندی
تحلیل حساسیت	انجام تحلیل حساسیت برای بررسی پایداری و تأثیر تغییرات معیارها	ممکن است کمتر به تحلیل حساسیت توجه شود	ممکن است کمتر به تحلیل حساسیت توجه شود
مطابقت رتبه	تحلیل مطابقت رتبه برای سازگاری در رتبه‌بندی	تحلیل مطابقت رتبه ممکن است دقت کمتری داشته باشد	تحلیل مطابقت رتبه ممکن است دقت کمتری داشته باشد

۹- بیانیه‌های نهایی

۹-۱- بحث و نتیجه‌گیری

چارچوب MVRM-CC که در این مطالعه پیشنهادشده است، یک راه‌حل جامع و مؤثر برای انتخاب سرویس‌های ابری SaaS قابل‌اطمینان ارائه می‌دهد. با یکپارچه‌سازی معیارهای قابلیت اطمینان چندگانه و بهره‌گیری از قدرت مدل زنجیره مارکوف، چارچوب MVRM-CC به چالش‌های مرتبط با انتخاب سرویس در محیط‌های ابری از قبیل ارزیابی ناکافی قابلیت اطمینان، عدم توجه کافی به پویایی سرویس‌ها و رضایت کاربران پاسخ می‌دهد. از طریق یک تجزیه‌وتحلیل جامع که شامل تحلیل حساسیت و ارزیابی مقایسه‌ای است، اثربخشی چارچوب MVRM-CC تأییدشده است. نتایج نشان می‌دهند که روش پیشنهادی یک راه‌حل سازگارتر نسبت به روش‌های موجود ارائه می‌دهد. چارچوب MVRM-CC نه‌تنها به عواملی مانند قابلیت مقیاس‌پذیری و انعطاف‌پذیری توجه می‌کند، بلکه به نحو مطلوبی قابلیت اطمینان سرویس‌های ابری را موردتوجه قرار می‌دهد. با به دست آوردن پویایی سرویس‌ها از طریق مدل زنجیره مارکوف، چارچوب امکان انتخاب سرویس‌هایی را فراهم می‌کند که نه‌تنها درخواست‌های کاربران را برآورده می‌کنند، بلکه سطوح بالایی از قابلیت اطمینان را نیز ارائه می‌دهند.

به‌عنوان گام‌های آتی، می‌توان تحقیقات بیشتری را برای بررسی معیارهای ارزیابی اضافی و پیاده‌سازی‌های عملی چارچوب MVRM-CC انجام داد. این کار قابلیت‌های آن را گسترش داده و ارزیابی جامع‌تری از سرویس‌های ابری ارائه خواهد داد. علاوه بر این، انجام مطالعات موردی و جلب ذینفعان صنایع می‌تواند بینش‌های ارزشمندی را درباره قابلیت استفاده عملی و عملکرد چارچوب ارائه دهد.

۹-۲- محدودیت‌ها

درحالی‌که چارچوب MVRM-CC رویکردی قابل‌اطمینان برای انتخاب سرویس‌های SaaS در محیط‌های ابری است، اما باید محدودیت‌های خاصی را در نظر بگیریم:

• **معیارهای محدود مرتبط باقابلیت اطمینان:** چارچوب پیشنهادی یک مجموعه خاص از معیارهای قابلیت اطمینان را یکپارچه می‌کند. کارهای آتی می‌توانند جستجوی اضافی در جهت درک بیشتری از جنبه‌های گسترده‌تری از قابلیت اطمینان را به‌عنوان معیارهای ارزیابی انجام دهند.

• **احتمال‌های انتقال ساده:** مدل زنجیره مارکوف استفاده‌شده در چارچوب پیشنهادی فرض می‌کند که احتمال‌های انتقال ثابت بین حالت‌های مختلف وجود دارد. در واقعیت، این احتمال‌ها ممکن است در طول زمان یا در پاسخ به شرایط مختلف تغییر کنند. تحقیقات آتی می‌توانند به بررسی مدل‌های پیشرفته‌تری شامل احتمال‌های انتقال پویا بپردازند.

• **فرض استقلال:** چارچوب فرض می‌کند که معیارهای قابلیت اطمینان و احتمال‌های انتقال مستقل از یکدیگر هستند. درحالی‌که در سناریوهای واقعی، ممکن است وابستگی‌ها و همبستگی‌هایی بین این عوامل وجود داشته باشد. ملاحظه چنین وابستگی‌هایی می‌تواند به ارزیابی دقیق‌تر و واقع‌گرایانه‌تر منجر شود.

۹-۳- دامنه کارهای آتی

بر اساس چارچوب MVRM-CC، تحقیقات آتی می‌تواند بر روی حوزه‌های زیر تمرکز کند:

• **توسعه معیارهای ارزیابی گسترده‌تر:** چارچوب می‌تواند به‌منظور گنجاندن معیارهای ارزیابی اضافی مانند هزینه، کارایی انرژی و حریم خصوصی گسترش یابد. این کار باعث ارزیابی جامع‌تری از سرویس‌های ابری SaaS می‌شود و تصمیم‌گیری بر اساس ابعاد چندگانه را پشتیبانی می‌کند.

• **پیاده‌سازی در عمل:** انجام مطالعات موردی و پیاده‌سازی عملی چارچوب در محیط‌های ابری واقعی، بینش‌های ارزشمندی درباره عملکرد و اثربخشی آن ارائه خواهد داد. این شامل همکاری با شرکای صنایع برای ارزیابی قابلیت استفاده و اعتبارسنجی نتایج در صنایع مختلف است.

• **الگوریتم‌های بهینه‌سازی:** توسعه الگوریتم‌های بهینه‌سازی در چارچوب می‌تواند به کاربران در شناسایی بهترین انتخاب سرویس‌ها بر اساس درخواست‌های خاص خود کمک کند. این الگوریتم‌ها می‌توانند با در نظر گرفتن محدودیت‌ها و هدف‌های مختلف مانند کمینه‌سازی هزینه، بهترین راه‌حل‌های ممکن را پیدا کنند.

• **سفارشی‌سازی متمرکز بر کاربر:** ارائه مؤلفه‌های سفارشی‌سازی در چارچوب به کاربران امکان می‌دهد تا ترجیحات و درخواست‌های خاص خود را در اولویت قرار دهند. این ممکن است شامل گنجاندن مکانیسم‌های بازخورد کاربر و سفارشی‌سازی چارچوب بر اساس پروفایل و ترجیحات شخصی کاربران باشد.

۱۰- تشکر و قدردانی

این مقاله بخشی از رساله دکتری خانم فریده لطیفی است که به راهنمایی دکتر رامین نصیری و مشاوره دکتر مهران محسن زاده و دکتر حمیدرضا مصطفایی تدوین‌شده است. از زحمات بی‌دریغ اساتید محترم، تشکر و قدردانی می‌شود.

۱۱- مآخذ

[1] H. M. Alabool and A. K. B. Mahmood, "A novel evaluation framework for improving trust level of Infrastructure as a Service," Cluster Computing, vol. 19, pp. 389-410, 2016.

[2] M. Godse and S. Mulik, "An approach for selecting software-as-a-service (SaaS) product," in 2009 IEEE International Conference on Cloud Computing, 2009: IEEE, pp. 155-158.

[3] L. Sun, "An influence diagram based cloud service selection approach in dynamic cloud marketplaces," Cluster Computing, vol. 22, no. Suppl 3, pp. 7369-7378, 2019.

[4] M. Abdel-Basset, M. Mohamed, and V. Chang, "NMCDA: A framework for evaluating cloud computing services," Future Generation Computer Systems, vol. 86, pp. 12-29, 2018.

[5] G. Baranwal and D. P. Vidyarthi, "A cloud service selection model using improved ranked voting method," Concurrency and Computation: Practice and Experience, vol. 28, no. 13, pp. 3540-3567, 2016.

[28] R. K. Tiwari and R. Kumar, "G-TOPSIS: a cloud service selection framework using Gaussian TOPSIS for rank reversal problem," The Journal of Supercomputing, vol. 77, no. 1, pp. 523-562, 2021.
[29] A. Hussain, J. Chun, and M. Khan, "A novel framework towards viable cloud service selection as a service (cssaas) under a fuzzy environment," Future Generation Computer Systems, vol. 104, pp. 74-91, 2020.
[30] R. K. Tiwari and R. Kumar, "A framework for prioritizing cloud services in neutrosophic environment," Journal of king saud university-computer and information sciences, vol. 34, no. 6, pp. 3151-3166, 2022.
[31] F. Smarandache et al. "Introduction to neutrosophy and neutrosophic environment," in Neutrosophic Set in Medical Image Analysis: Elsevier, 2019, pp. 3-29.
[32] Y. Çelikbilek and F. Tüysüz, "An in-depth review of theory of the TOPSIS method: An experimental analysis," Journal of Management Analytics, vol. 7, no. 2, pp. 281-300, 2020.
[33] S. Mandal and D. A. Khan, "Cloud-CoCoSo: cloud model-based combined compromised solution model for trusted cloud service provider selection," Arabian Journal for Science and Engineering, vol. 47, no. 8, pp. 10307-10332, 2022.
[34] Neeraj, M. S. Goraya, and D. Singh, "A comparative analysis of prominently used MCDM methods in cloud environment," The Journal of Supercomputing, vol. 77, pp. 3422-3449, 2021.
[35] T. E. Trueman, P. Narayanasamy, and J. Ashok Kumar, "A graph-based method for ranking of cloud service providers," The Journal of Supercomputing, vol. 78, no. 5, pp. 7260-7277, 2022.
[36] R. Krishankumar, R. Sivagami, A. Saha, P. Rani, K. Arun, and K. Ravichandran, "Cloud vendor selection for the healthcare industry using a big data-driven decision model with probabilistic linguistic information," Applied Intelligence, vol. 52, no. 12, pp. 13497-13519, 2022.
[37] N. Ghorui et al. "Selection of cloud service providers using MCDM methodology under intuitionistic fuzzy uncertainty," Soft Computing, vol. 27, no. 5, pp. 2403-2423, 2023.
[38] N. Thakur, A. Singh, and A. Sangal, "SelTCS: a framework for selecting trustworthy cloud services," Sādhanā, vol. 48, no. 2, p. 87, 2023.
[39] R. R. Kumar, B. Kumari, and C. Kumar, "CCS-OSSR: a framework based on hybrid MCDM for optimal service selection and ranking of cloud computing services," Cluster Computing, vol. 24, no. 2, pp. 867-883, 2021.
[40] R. R. Kumar, S. Mishra, and C. Kumar, "A novel framework for cloud service evaluation and selection using hybrid MCDM methods," Arabian Journal for Science and Engineering, vol. 43, pp. 7015-7030, 2018.
[41] M. Faiz and A. Daniel, "A multi-criteria cloud selection model based on fuzzy logic technique for QoS," International Journal of System Assurance Engineering and Management, vol. 15, no. 2, pp. 687-704, 2024.
[42] F. Latifi, R. Nassiri, M. Mohsenzadeh, and H. Mostafaei, "Enhancing Cloud Service Selection through Enterprise Architecture with the rSCS Framework," in 2023 7th Iranian Conference on Advances in Enterprise Architecture (ICAEA), 2023: IEEE, pp. 1-8.
[43] A. Makwe et al. "Cloud service prioritization using a Multi-Criteria Decision-Making technique in a cloud computing environment," Ain Shams Engineering Journal, vol. 15, no. 7, p. 102785, 2024.
[44] J. Siegel and J. Perdue, "Cloud services measures for global use: the service measurement index (SMI)," in 2012 Annual SRII global conference, 2012: IEEE, pp. 411-415.
[45] R. Vidhyalakshmi and V. Kumar, "CORE framework for evaluating the reliability of SaaS products," Future Generation Computer Systems, vol. 72, pp. 23-36, 2017.
[46] V. Kumar and R. Vidhyalakshmi, Reliability Aspect of Cloud Computing Environment. Springer, 2018.
[47] A. M. Mostafa, "A Hybrid Framework for Ranking Cloud Services Based on Markov Chain and the Best-Only Method," IEEE Access, vol. 11, pp. 50-66, 2022.
[48] A. Jaiswal and R. Mishra, "Cloud service selection using TOPSIS and fuzzy TOPSIS with AHP and ANP," in Proceedings of the 2017 international conference on machine learning and soft computing, 2017, pp. 136-142.
[49] W. Serrai, A. Abdelli, L. Mokdad, and A. Serrai, "How to deal with QoS value constraints in MCDM based web service selection," Concurrency and Computation: Practice and Experience, vol. 31, no. 24, p. e4512, 2019.
[50] N. Somu, G. R. MR, K. Kirthivasan, and S. S. VS, "A trust centric optimal service ranking approach for cloud service selection," Future Generation Computer Systems, vol. 86, pp. 234-252, 2018.
[51] L. Sun, H. Dong, F. K. Hussain, O. K. Hussain, and E. Chang, "Cloud service selection: State-of-the-art and future research directions,"
[6] S. K. Garg, S. Versteeg, and R. Buyya, "A framework for ranking of cloud computing services," Future Generation Computer Systems, vol. 29, no. 4, pp. 1012-1023, 2013.
[7] C. Jatoth, G. Gangadharan, U. Fiore, and R. Buyya, "SELCLOUD: a hybrid multi-criteria decision-making model for selection of cloud services," Soft Computing, vol. 23, pp. 4701-4715, 2019.
[8] M. H. Nejat, H. Motameni, H. Vahdat-Nejad, and B. Barzegar, "Efficient cloud service ranking based on uncertain user requirements," Cluster Computing, pp. 1-18, 2022.
[9] A. Darko, A. P. C. Chan, E. E. Ameyaw, E. K. Owusu, E. Pärn, and D. J. Edwards, "Review of application of analytic hierarchy process (AHP) in construction," International journal of construction management, vol. 19, no. 5, pp. 436-452, 2019.
[10] M. B. Kar, R. Krishankumar, D. Pamucar, and S. Kar, "A decision framework with nonlinear preferences and unknown weight information for cloud vendor selection," Expert Systems with Applications, vol. 213, p. 118982, 2023.
[11] A. Tomar, R. R. Kumar, and I. Gupta, "Decision making for cloud service selection: a novel and hybrid MCDM approach," Cluster computing, vol. 26, no. 6, pp. 3869-3887, 2023.
[12] Z. Ma, M. H. Nejat, H. Vahdat-Nejad, B. Barzegar, and S. Fatehi, "An efficient hybrid ranking method for cloud computing services based on user requirements," IEEE Access, vol. 10, pp. 72988-73004, 2022.
[13] N. A. M. Saffie and K. A. Rasmani, "Fuzzy delphi method: Issues and challenges," in 2016 International Conference on Logistics, Informatics and Service Sciences (LISS), 2016: IEEE, pp. 1-7.
[14] T. M. Hang Nguyen, V. Nguyen, and D. Nguyen, "Selecting cloud database services provider through multi-attribute group decision making: a probabilistic uncertainty linguistics TODIM model," Applied Mathematics in Science and Engineering, vol. 31, no. 1, p. 2156502, 2023.
[15] R. R. Kumar, M. Shameem, and C. Kumar, "A computational framework for ranking prediction of cloud services under fuzzy environment," Enterprise information systems, vol. 16, no. 1, pp. 167-187, 2022.
[16] T. Mahmood, H. M. Waqas, U. U. Rehman, and M. Aslam, "Selection of Cloud Services Provider by Utilizing Multi-Attribute Decision-Making Based on Hesitant Bipolar Complex Fuzzy Dombi Aggregation Operators," IEEE Access, 2024.
[17] S. G. Bhol, S. Mohanty, and P. K. Pattnaik, "Machine Learning as a Service Cloud Selection: An MCDM Approach for Optimal Decision Making," Procedia Computer Science, vol. 233, pp. 909-918, 2024.
[18] L. Sun, H. Dong, O. K. Hussain, F. K. Hussain, and A. X. Liu, "A framework of cloud service selection with criteria interactions," Future Generation Computer Systems, vol. 94, pp. 749-764, 2019.
[19] M. Grabisch and C. Labreuche, "Bi-capacities—II: the Choquet integral," Fuzzy sets and systems, vol. 151, no. 2, pp. 237-259, 2005.
[20] C. Tan and X. Chen, "Intuitionistic fuzzy Choquet integral operator for multi-criteria decision making," Expert Systems with Applications, vol. 37, no. 1, pp. 149-157, 2010.
[21] Z. Xu, "Choquet integrals of weighted intuitionistic fuzzy information," Information Sciences, vol. 180, no. 5, pp. 726-736, 2010.
[22] A. Al-Faifi, B. Song, M. M. Hassan, A. Alamri, and A. Gumaei, "A hybrid multi criteria decision method for cloud service selection from Smart data," Future Generation Computer Systems, vol. 93, pp. 43-57, 2019.
[23] X. Li, Y. Ran, C. Fafa, X. Zhu, H. Wang, and G. Zhang, "A maintenance strategy selection method based on cloud DEMATEL-ANP," Soft Computing, vol. 27, no. 24, pp. 18843-18868, 2023.
[24] G. Obulaporam, N. Somu, G. R. Manilyer Ramani, A. K. Boopathy, and S. S. Vathula Sankaran, "GCRITICPA: A CRITIC and grey relational analysis based service ranking approach for cloud service selection," in Advances in Data Science: Third International Conference on Intelligent Information Technologies, ICIIT 2018, Chennai, India, December 11–14, 2018, Proceedings 3, 2019: Springer, pp. 3-16.
[25] M. Saha, S. K. Panda, S. Panigrahi, and D. Taniar, "An efficient composite cloud service model using multi-criteria decision-making techniques," The Journal of Supercomputing, vol. 79, no. 8, pp. 8754-8788, 2023.
[26] G. Büyüközkan, F. Göçer, and O. Feyzioğlu, "Cloud computing technology selection based on interval-valued intuitionistic fuzzy MCDM methods," Soft Computing, vol. 22, no. 15, pp. 5091-5114, 2018.
[27] O. Gireesha, N. Somu, K. Krithivasan, and S. S. VS, "IIVIFS-WASPAS: an integrated multi-criteria decision-making perspective for cloud service provider selection," Future Generation Computer Systems, vol. 103, pp. 91-110, 2020.

Journal of Network and Computer Applications, vol. 45, pp. 134-150, 2014.
[52] S. S. Chauhan, E. S. Pilli, and R. C. Joshi, "BSS: a brokering model for service selection using integrated weighting approach in cloud environment," Journal of Cloud Computing, vol. 10, pp. 1-14, 2021.
[53] R. Douc, E. Moulines, P. Priouret, and P. Soulier, Markov chains. Springer, 2018.
[54] M. Yang, T. Gao, W. Xie, L. Jia, and T. Zhang, "The assessment of cloud service trustworthiness state based on DS theory and Markov chain," IEEE Access, vol. 10, pp. 68618-68632, 2022.
[55] S. S. Xie and Y. Tu, Rapid one-of-a-kind product development: Strategies, algorithms and tools. Springer Science & Business Media, 2011.
[56] A. M. Mostafa, "An MCDM approach for cloud computing service selection based on best-only method," IEEE Access, vol. 9, pp. 155072-155086, 2021.
[57] F. Nawaz, M. R. Asadabadi, N. K. Janjua, O. K. Hussain, E. Chang, and M. Saberi, "An MCDM method for cloud service selection using a Markov chain and the best-worst method," Knowledge-Based Systems, vol. 159, pp. 120-131, 2018.
[58] P. Buchholz, "Structured analysis approaches for large Markov chains," Applied Numerical Mathematics, vol. 31, no. 4, pp. 375-404, 1999.
[59] P. J. Schweitzer, "A survey of aggregation-disaggregation in large Markov chains," Numerical solution of Markov chains, pp. 63-88, 2021.
[60] J. Fan, R. Li, C.H. Zhang, and H. Zou, Statistical foundations of data science. Chapman and Hall/CRC, 2020.
[61] R. Gemulla, E. Nijkamp, P. J. Haas, and Y. Sismanis, "Large-scale matrix factorization with distributed stochastic gradient descent," in Proceedings of the 17th ACM SIGKDD international conference on Knowledge discovery and data mining, 2011, pp. 69-77.
[62] Y. Koren, R. Bell, and C. Volinsky, "Matrix factorization techniques for recommender systems," Computer, vol. 42, no. 8, pp. 30-37, 2009.
[63] O. Baker, "The adoption of cloud computing CRM in SME's, Southland, New Zealand," in 2020 IEEE Conference on Open Systems (ICOS), 2020: IEEE, pp. 1-6.
[64] Y.S. Chen, C. Wu, H.H. Chu, C.K. Lin, and H.M. Chuang, "Analysis of performance measures in cloud-based ubiquitous SaaS CRM project systems," The Journal of Supercomputing, vol. 74, pp. 1132-1156, 2018.
[65] F. M. Elbahri, O. I. Al-Sanjary, M. A. Ali, Z. A. Naif, O. A. Ibrahim, and M. Mohammed, "Difference comparison of SAP, Oracle, and Microsoft solutions based on cloud ERP systems: A review," in 2019 IEEE 15th International Colloquium on Signal Processing & Its Applications (CSPA), 2019: IEEE, pp. 65-70.
[66] C. Höfer and G. Karagiannis, "Cloud computing services: taxonomy and comparison," Journal of Internet Services and Applications, vol. 2, pp. 81-94, 2011.
[67] O. Oyekola and L. Xu, "Selecting SAAS CRM solution for SMEs," in Proceedings of the 10th international conference on information systems and technologies, 2020, pp. 1-9.
[68] A. Souri, P. Asghari, and R. Rezaei, "Software as a service based CRM providers in the cloud computing: challenges and technical issues," Journal of Service Science Research, vol. 9, pp. 219-237, 2017.
[69] D. N. Le, S. Pal, and P. K. Pattnaik, "Reliability Issues in Cloud Computing Environment," Cloud Computing Solutions: Architecture, Data Storage, Implementation and Security, pp. 103-121, 2022.
[70] M. R. Mesbahi, A. M. Rahmani, and M. Hosseinzadeh, "Reliability and high availability in cloud computing environments: a reference roadmap," Human-centric Computing and Information Sciences, vol. 8, pp. 1-31, 2018.
[71] R. N. Calheiros, R. Ranjan, A. Beloglazov, C. A. De Rose, and R. Buyya, "CloudSim: a toolkit for modeling and simulation of cloud computing environments and evaluation of resource provisioning algorithms," Software: Practice and experience, vol. 41, no. 1, pp. 23-50, 2011.
[72] M. Hosseinzadeh, H. K. Hama, M. Y. Ghafour, M. Masdari, O. H. Ahmed, and H. Khezri, "Service selection using multi-criteria decision making: a comprehensive overview," Journal of Network and Systems Management, vol. 28, pp. 1639-1693, 2020.
[73] D. Varapravathu Kunhambu and R. V. Siva Balan, "Efficient multi-objective particle swarm optimisation based ranking system for cloud service selection," IET Communications, vol. 13, no. 3, pp. 297-304, 2019.
[74] Y. Wang, J. Wen, Q. Wu, L. Guo, and B. Tao, "A dynamic cloud service selection model based on trust and SLA in cloud computing,"
International Journal of Grid and Utility Computing, vol. 10, no. 4, pp. 334-343, 2019.

معرفی نویسندگان:

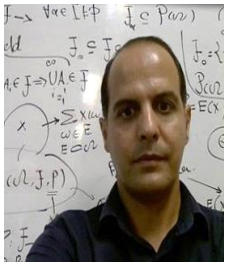
فریده لطیفی، دانشجوی دکتری مهندسی نرم‌افزار کامپیوتر است. حوزه‌های پژوهشی موردعلاقه او شامل رایانش ابری، مهندسی نرم‌افزار، سامانه‌های توصیه‌گر، کلان‌داده، فرایندهای تصادفی و سایر موضوعات مرتبط می‌شود. او با تمرکز بر بهبود تجربه کاربری، مدل‌سازی رفتارهای نرم‌افزاری و توسعه دانش در زمینه مهندسی نرم‌افزار، به دنبال ایجاد تأثیرات مثبت و ماندگار در حوزه‌های علمی و صنعتی است.

دکتر مهران محسن‌زاده مدرک کارشناسی خود را در رشته مهندسی نرم‌افزار در سال ۱۹۹۷ از دانشگاه شهید بهشتی دریافت کرد. او مدرک کارشناسی ارشد (در سال ۱۹۹۹) و دکترای خود را در رشته مهندسی نرم‌افزار در سال ۲۰۰۴ از دانشگاه آزاد اسلامی واحد تهران اخذ کرد.

حوزه‌های موردعلاقه او شامل رایانش ابری، مهندسی نرم‌افزار و کلان‌داده است. وی تاکنون بیش از ۹۰ مقاله (به‌عنوان نویسنده یا هم‌نویسنده) در اجلاس‌ها و مجلات بین‌المللی منتشر کرده است. او دانشیار گروه مهندسی کامپیوتر در واحد علوم و تحقیقات دانشگاه آزاد اسلامی ایران است.

دکتر رامین نصیری مدرک کارشناسی خود را در رشته مهندسی نرم‌افزار کامپیوتر در سال ۱۹۸۹ از دانشگاه تهران دریافت کرد. او مدرک کارشناسی ارشد را در سال ۱۹۹۵ و دکترای خود را در سال ۲۰۰۳ در همین رشته از دانشگاه آزاد اسلامی تهران اخذ کرد.

وی در حال حاضر به‌عنوان استاد گروه مهندسی کامپیوتر در دانشگاه آزاد اسلامی فعالیت می‌کند و تاکنون بیش از ۱۰۰ مقاله در مجلات و اجلاس‌های معتبر علمی و حرفه‌ای منتشر کرده است. از سال ۲۰۰۰، دکتر نصیری یکی از بنیان‌گذاران سه شرکت فناوری اطلاعات در ایران و امارات متحده عربی بوده و طی دهه گذشته مدیریت چندین پروژه ملی فناوری اطلاعات را باهدف ارتقای رفاه عمومی از طریق استفاده از فناوری‌های اطلاعات و ارتباطات (ICT) بر عهده داشته است. حوزه‌های پژوهشی موردعلاقه او شامل مهندسی نرم‌افزار، معماری سازمانی، کلان‌داده، آزمون نرم‌افزار، اینترنت اشیاء (IoT) و سایر موضوعات مرتبط است.



دکتر حمیدرضا مصطفایی به‌عنوان دانشیار در گروه آمار دانشگاه آزاد اسلامی، واحد تهران شمال، ایران مشغول به کار است. او مدرک کارشناسی خود را در رشته ریاضیات کاربردی از دانشگاه گیلان (رشت) و مدرک کارشناسی ارشد خود را در رشته آمار از دانشگاه آزاد اسلامی واحد تهران شمال دریافت کرده است.

وی در سال ۲۰۰۵ مدرک دکترای خود را در رشته آمار کاربردی از دانشگاه آزاد اسلامی، واحد علوم و تحقیقات تهران اخذ کرده است. حوزه‌های پژوهشی موردعلاقه او شامل آمار، فرآیندهای تصادفی، نظریه احتمال و علم داده است.