

## بهینه‌سازی زنجیره تأمین ماشین‌های مجازی در خواستی کاربران در محیط رایانش ابری با رویکرد رایانش سبز و تصمیم پایدار

رامتین نظری

کارشناس ارشد مدیریت کسب و کار - دانشکده مدیریت و اقتصاد - واحد علوم تحقیقات - دانشگاه آزاد اسلامی - تهران - ایران  
پست الکترونیکی: ramtin.n1374@gmail.com

حسین عموزاد خلیلی\*

استادیار گروه مهندسی صنایع - واحد ساری - دانشگاه آزاد اسلامی - ساری - ایران  
پست الکترونیکی: amoozad92@yahoo.com

میرسعید حسینی شیروانی

استادیار گروه مهندسی کامپیوتر - واحد ساری - دانشگاه آزاد اسلامی - ساری - ایران  
پست الکترونیکی: mirsaeid\_hosseini@yahoo.com

### چکیده

نامغلوب-ازدحام ذرات سفارشی شده (NSGAI-PSO) ارائه می‌شود. جهت اعتبار سنجی روش پیشنهادی، ۲۰ سناریوی مختلف در مقیاس‌های کوچک و بزرگ مطرح شد و کارایی اجرای الگوریتم پیشنهادی با دو الگوریتم بهینه‌سازی موفق MOPSO و NSGAI در شرایط یکسان مقایسه شد. نتایج آزمایشات و شبیه‌سازی‌ها نشان می‌دهد روش پیشنهادی از لحاظ تابع میانگین رتبه‌بندی با در نظر گرفتن تمامی اهداف مسئله به میزان ۲۳٪ و ۴۰٪ به ترتیب نسبت به الگوریتم‌های MOPSO و NSGAI برتری دارد. **واژه‌های کلیدی:** رایانش ابری سبز، زنجیره تأمین ماشین‌های مجازی، الگوریتم ژنتیک نامغلوب، الگوریتم ازدحام ذرات

با گسترش سریع فناوری و توسعه زیرساخت‌های فناوری اطلاعات، نیاز به بهینه‌سازی زنجیره تأمین به‌منظور انجام محاسبات و تولید در محیط رایانش ابری بیش از پیش احساس می‌گردد. ایجاد یک زنجیره تأمین کارا به گونه‌ای که نیازهای درخواست‌کنندگان و ارائه‌دهندگان سرویس‌های ابری را در کمترین زمان و هزینه با بالاترین کیفیت ارائه دهد، یکی از چالش‌های مطرح در این حوزه است. مقاله حاضر، مسئله زنجیره تأمین ماشین‌های مجازی درخواستی کاربران در محیط ابری را به یک مسئله بهینه‌سازی چندهدفه با رویکرد کمینه کردن هدررفت منابع، توازن بار، کاهش انتقالات داده در شبکه، مصرف انرژی الکتریکی و هزینه سراسری به‌منظور نیل به زنجیره تأمین سبز مدل‌سازی می‌کند. به‌منظور حل این مسئله پیچیده، یک الگوریتم بهینه‌سازی ترکیبی ژنتیک

### ۱. مقدمه

در طول سال‌های گذشته، به دلیل تقاضای زیاد

\* نویسنده مسئول

شرکت‌های متفاوت برای انجام محاسبات گوناگون به وسیله ابزارهای محاسباتی پیشرفته، سبب شده است که دنیای محاسبات با تغییر و تحولات فراوان مواجه گردد و ظهور نمونه‌های محاسباتی جدید مثل رایانش ابری از جمله یکی از آن پدیده‌ها می‌باشد. امروزه صنعت رایانش ابری به یک زنجیره تأمین جدید بین ارائه‌دهندگان سرویس محاسباتی و درخواست‌دهندگان سرویس تبدیل شده است [۱]. در صنعت رایانش ابری سرویس‌ها در قالب زیرساخت، بستر و برنامه‌های کاربردی ارائه می‌شوند و مبنای اصلی انجام این کار استفاده از فناوری مجازی‌سازی است. این فناوری به وسیله ماشین‌های مجازی که هر کدام از آن‌ها می‌توانند سخت‌افزار، نرم‌افزار و سیستم عامل مختص به خود را داشته باشند پیاده‌سازی خواهد شد. همچنین ماشین‌های مجازی خود بر روی چندین ماشین فیزیکی قرار خواهند گرفت تا کارهای محاسباتی کاربران را انجام دهند. با افزایش برنامه‌های کاربردی تحت وب مثل شبکه‌های اجتماعی، داده‌های حجیم، برنامه‌های هوشمند و وسایل نقلیه، پردازش برخط تصاویر و ویدئو، مراکز ابری روز به روز مدرن‌تر و پیچیده‌تر می‌شوند؛ تا سرویس‌های درخواست شده را پوشش دهند [۲، ۳]. بر همین اساس کاربران رایانش ابری نیازمند دریافت محاسبات سریع و لحظه‌ای با کمترین هزینه ممکن هستند. لذا کاربران به یک سیستم کارا به منظور تخصیص منابع که مناسب محیط‌های ابری باشد نیازمند می‌باشند و این مسئله یکی از چالش برانگیزترین مسائل در حوزه مدیریت منابع رایانش ابری در سال‌های اخیر بوده است. به همین منظور محققان بیشماری سعی در ارائه راهکارهای متفاوت در این زمینه بوده‌اند. همچنین محاسبات ابری خدمات فناوری اطلاعات زیادی را برای کاربران در سراسر جهان ارائه می‌دهد. افزایش تقاضا منجر به افزایش خدمات و در نتیجه ایجاد مراکز داده محاسباتی با مقیاس بزرگ شده که علاوه بر هزینه‌های عملیاتی بالا، مقادیر عظیمی از توان الکتریکی را مصرف می‌کند. از طرفی سیستم‌های خنک‌کننده ناکافی

و ناکارآمد، نه تنها باعث گرم شدن بیش از حد منابع و کاهش عمر کاری دستگاه‌ها می‌شود، بلکه باعث تولید گازکربن‌دی‌اکسید شده که در گازهای گلخانه‌ای تولیدی و در وضعیت آب و هوا نقش مهمی دارد. [۴ و ۵].

در [۴] یک الگوریتم شبیه‌سازی تبرید فلزات به منظور جایابی ماشین‌های مجازی در محیط ابرهمگن ارائه شد. مدل پیشنهادی مسئله مورد نظر را به یک مسئله بهینه‌سازی خطی فرموله‌بندی می‌کند. اجرای الگوریتم پیشنهادی در سناریوهای مختلف برتری آن را در برابر سایر روش‌ها از لحاظ پارامترهای ارزیابی در نظر گرفته شده مثل توان برق مصرفی کل نشان می‌دهد. فرزای و همکاران یک مدل بهینه‌سازی چند هدفه بر مبنای الگوریتم ژنتیک برای جایابی ماشین‌های مجازی در معماری پورتلند مراکز داده‌ای ابر با رویکرد کاهش مصرف انرژی، کاهش هدررفت و بهینه‌سازی پهنای باند شبکه ارائه دادند [۵]. در فناوری نوظهور اینترنت اشیا و محاسبات مه نیز پژوهش مشابهی به منظور مدیریت توان مصرفی و افزایش قابلیت اطمینان انجام شد. رمضان‌پور و همکاران یک الگوریتم چندهدفه بر مبنای جستجوی فاخته به منظور توزیع مؤلفه‌های نرم‌افزاری روی گره‌های مه ارائه دادند. در این مقاله؛ توزیع مؤلفه‌ها با منظور جلوگیری از یک نقطه شکست بوده است، در عین حال تراکم ماشین‌های مجازی به نحوی انجام می‌شود تا با استفاده از حداقل گره‌های مه گامی در جهت مدیریت توان مصرفی مراکز داده‌ای کوچک (Micro Datacenter) مه برداشته شود [۶].

زنجیره تأمین ماشین‌های مجازی در حوزه رایانش ابری یک تکنیک مدیریتی قدرتمند به منظور رسیدن به عملکرد بهتر، بهبود مصرف منابع، تحمل‌پذیری خطا، کاهش مصرف انرژی و پشتیبانی راحت‌تر از سیستم است. به همین منظور امروزه طرح‌های ناکارآمد جایگذاری ماشین‌های مجازی روی ماشین‌های فیزیکی مراکز داده‌ای ابر باعث ایجاد مسئله بهینه‌سازی چند هدفه با رویکرد کاهش هدررفت منابع و مصرف انرژی شده است. از آنجائی

که امروزه توسعه فناوری اطلاعات با رویکرد سبز ارائه می‌شود. سعیدی و حسینی شیروانی یک الگوریتم جایابی ماشین‌های مجازی به منظور مدیریت توان مصرفی و تأمین توافق سطح سرویس بین کاربر و ارائه دهندگان ابر ارائه دادند [۷]. در همین راستا، کردگاری و همکاران، در مقاله‌ای به ترکیب سرویس‌ها در ساخت و تولید ابری و مدل‌سازی ریاضی و توسعه الگوریتم فراابتکاری مبتنی بر تحلیل چشم‌انداز پرداختند [۸]. در این پژوهش، به عنوان نخستین نوآوری، مدل‌سازی عدد صحیح مسئله ترکیب سرویس‌ها ضمن رعایت ساختار عمومی ترکیب سرویس‌ها (متشکل از ساختارهای متوالی، موازی و حلقه‌ای) ارایه شد؛ حمل و نقل بین منابع تولیدی پراکنده در سطح جغرافیا نیز به عنوان یک نوآوری جدید در مدل ریاضی لحاظ گردید. جهت حل بهینه مسئله نمونه از الگوریتم شاخه و کران و به منظور حل بهینه و یا نزدیک به بهینه مسئله از الگوریتم فراابتکاری جستجوی محلی بهره گرفته می‌شود [۸]. و همکاران در سال ۲۰۱۵ در پژوهش خود به طراحی تحمل و تنظیم محصولات سفارشی یکپارچه بر اساس تولید ابری پرداختند. یک کنترل پویا را معرفی می‌کنند که در هر مرحله از تولید مجدداً منابع را بر اساس واقعیت سازماندهی می‌کنند [۹]. وانگ و همکاران، در پژوهش خود به مطالعه سیستم تولید روی ابر و یک مطالعه موردی در مورد برنامه‌ریزی فرآیند مبتنی بر ابر پرداختند. در این پژوهش، مدل‌های عملی سیستم مبتنی بر ابر مورد بررسی قرار گرفته و خدمات برنامه‌ریزی فرآیند توزیع‌شده بر این اساس توسعه می‌یابد [۱۰]. رن و همکاران، به بررسی تولید ابری، ویژگی‌ها و کاربردهای آن پرداختند. این مقاله یک مرور انتقادی از مفاهیم و ایده‌های مرتبط در محاسبات ابری و همچنین فناوری‌های ساخت پیشرفته که به تکامل تولید به روش ابری کمک می‌کنند، ارائه می‌کند. ویژگی‌های کلیدی تولید به روش ابری را نیز به منظور روشن شدن مفهوم تولید ابری ارائه می‌کنند. علاوه بر این، یک ساختار چهار فرآیندی برای توصیف سناریوی معمول در تولید

به روش ابر پیشنهاد شده است، به امید این‌که یک مرجع نظری برای کاربردهای عملی فراهم کند. در نهایت، یک مورد کاربردی از یک سیستم تولید ابر خصوصی برای یک مجتمع تولیدی ارائه می‌شود [۱۱].

ریاحی و کریچن، یک الگوریتم ژنتیک چند منظوره برای حل مشکل جایگذاری ماشین‌های مجازی پیشنهاد کرده‌اند. در این تحقیق از شبیه‌سازی برنولی نیز برای تأیید سازگاری کار پیشنهادی انجام پذیرفته است. هدف اساسی این کار کاهش حداقلی میزان استفاده از سرویس‌دهنده‌های فیزیکی بدون کاهش کیفیت خدمات در محیط ابر است. همچنین چارچوبی برای کاهش اتلاف منابع در داخل این محیط نیز پیشنهاد شده است. در آزمایش اجرای واقعی، مشکل استقرار ماشین مجازی در شرکت مورد نظر در تحقیق با موفقیت بهینه‌سازی شده است. همچنین، این الگوریتم هزینه‌های عملیاتی را نیز کاهش می‌دهد. با این حال، هیچ سازوکاری برای مدیریت کارآمد داده‌های بزرگ وجود ندارد [۱۲]. گرو و همکاران، سازوکاری برای حل مشکلات تخصیص ماشین‌های مجازی و مشکلات انتخاب الگوی ماشین‌های مجازی پیشنهاد کردند. اهداف اساسی کار انجام شده به حداقل رساندن مصرف برق و کاهش هدررفت منابع ماشین‌های فیزیکی است. برای حل مسائل فوق، نویسندگان رویکردی را با تمرکز بر مجازی‌سازی در بستر هادوپ ارائه کردند. در این تحقیق مصرف برق ۹/۱ درصد کاهش یافت. با این حال، تخصیص ماشین‌های مجازی طی این روش برای کاربرانی که نیازمند محاسبات سریع هستند مناسب نمی‌باشد [۱۳]. هوآنگ و همکاران، الگوریتم پویای بهینه‌سازی برای زمان‌بندی کارها ارائه کردند که براساس نوع، آن‌ها را گروه‌بندی کرده و در یک صف اولویت قرار می‌دهد. سپس، آن‌ها را طبق اولویت زمان‌بندی می‌کند. این الگوریتم سعی دارد زمان اجرا و نیز هزینه را به حداقل برساند. الگوریتم کارآمدی وجود دارد که این چالش‌های اصلی زمان‌بندی کارها در ابر را مورد توجه قرار می‌دهد. کارهای ورودی توسط الگوریتم

زنجیره تامین‌کننده کارهای مرکزی بر اساس الزامات درخواستی مورد نظر کاربر، مانند زمان اجرا یا هزینه حداقل، انتخاب می‌شوند و سپس مورد اولویت دهی قرار می‌گیرند. این الگوریتم به نام الگوریتم زمان‌بندی<sup>۱</sup> TPD نامیده می‌شود که در آن T به انتخاب کارها، P به اولویت (بر حسب هزینه) و D به فرجه زمانی اشاره می‌کنند [۱۴].

بعد از بررسی ادبیات تحقیق، مقاله حاضر با توجه به کاستی‌ها و اشکالات موجود در مطالعات قبلی، مسئله زنجیره تامین ماشین‌های مجازی درخواستی از ارائه‌دهندگان ابر به منظور پوشش اهداف کل سهامداران به یک مسئله بهینه‌سازی چند هدفه مدل‌سازی می‌شود. این مقاله برای حل این مسئله پیچیده، درصد آن است تا با طراحی یک الگوریتم ژنتیک بهبودیافته به منظور کاهش مصرف انرژی الکتریکی و هدر رفت منابع موجب کاهش هزینه‌ها در زنجیره تامین ماشین‌های مجازی درخواستی کاربران برای شرکت‌های ارائه‌دهنده این سرویس‌ها موجب نیل به اهداف رایانش سبز و تصمیم پایدار گردد. الگوریتمی که ارائه خواهد شد می‌تواند با تخصیص مناسب ماشین‌های مجازی باعث کاهش زمان اجرای کارها، تعداد ماشین‌های مجازی فعال و در نتیجه کاهش زمان انتظار کارهای دیگر موجود در صف کار هر ماشین مجازی، کاهش هزینه‌ها و انرژی مصرفی هر ماشین مجازی شود. ساختار مقاله حاضر به صورت زیر سازمان‌دهی می‌شود: بخش ۲، به مدل ریاضی روش پیشنهادی و بیان مسئله می‌پردازد. الگوریتم پیشنهادی در بخش ۳ ارائه می‌شود. همچنین الگوریتم پیشنهادی در بخش ۴ مورد ارزیابی قرار می‌گیرد. بخش ۵ نیز نتیجه‌گیری نهایی مقاله را ارائه می‌دهد.

## ۲- مدل ریاضی روش پیشنهادی و بیان رسمی مسئله

مسئله تخصیص منابع یک چالش بزرگ در محیط‌های ابری می‌باشد و رابطه مستقیم با میزان مصرف انرژی، سود فراهم‌کنندگان سرویس و هزینه کاربران دارد؛ از این‌رو، پژوهش‌های زیادی در زمینه کاهش تعداد منابع

1- Task Priority Deadline (TPD)

فیزیکی یا مجازی مورد استفاده با به‌کارگیری روش‌های مجازی‌سازی و ایجاد تعادل بار و یکپارچگی منابع فیزیکی انجام شده است. پس از تخصیص منابع محاسباتی به کاربران، نیاز به اتخاذ تصمیماتی درباره زمان‌بندی وظایف می‌باشد. مسئله زمان‌بندی وظایف در رایانش ابری، مسئله‌ای بسیار مهم محسوب می‌شود که سعی دارد یک زمان‌بندی بهینه برای اجرای وظایف و تخصیص منبع بهینه مشخص نماید. حال با توجه به دو مسئله تخصیص و زمان‌بندی که دو عنصر اصلی در مسئله زنجیره تامین رایانش ابری محسوب می‌شوند، در این بخش از مقاله، به ارائه یک مدل ریاضی جامع در بهینه‌سازی این زنجیره تامین بسیار مهم و حیاتی، پرداخته می‌شود. در مسئله زنجیره تامین ابری پیش‌رو، به‌طور کلی،  $m$  ماشین مجازی و  $n$  کار موجود است. باید توجه داشت که  $m$  ماشین در  $C$  سلول (سرویس‌دهنده) مستقر بوده و از هر کدام، یک یا بیشتر موجود است. هرکار (درخواست از سمت کاربران) دارای یک فرآیند خاص است و توالی انجام عملیات مختلف به‌منظور تکمیل آن کار مشخص است. همچنین، هر یک از کارها دارای تعدادی کار فرعی یا وظیفه می‌باشد. انجام هر وظیفه از هر کار بر روی هر ماشین، دارای زمان پردازش خاص خود است. ظرفیت سخت‌افزاری و نرم‌افزاری سرویس‌دهنده‌ها و ماشین‌های مجازی مشخص بوده و هر ماشین تنها یک عملیات یا وظیفه را در هر لحظه می‌تواند انجام دهد. فرض بر این است که در صورت شروع یک عملیات، قطع آن مجاز نیست. در این مسئله، عملیات مربوط به پردازش هر کار بر روی ماشین‌های مجازی مورد نیاز برای پردازش در سرویس‌دهنده که ماشین مستقر است، زمان‌بندی می‌گردد. هدف از حل این مسئله، مشخص کردن توالی انجام کارها در هر سرویس‌دهنده است که هم اهداف کاربران و هم اهداف فراهم‌کنندگان خدمت برآورده شود. به‌طوری که اهداف:

- (۱) به حداقل رساندن انتقال میان سرویس‌دهنده‌ها به جهت کاهش مخارج ارتباطی

جدول ۱: معرفی شاخص‌های استفاده شده در مدل بهینه‌سازی پیشنهادی

شاخص‌ها	
{u, l, i}	شاخص وظیفه
{v, h, z}	شاخص کار
p	شاخص نوع ماشین مجازی
r	شاخص شماره ماشین مجازی
k	شاخص سرویس‌دهنده

در (۵) - (۹) مدل می‌شوند منوط به این‌که محدودیت‌ها و قیود (۱۰) - (۳۲) لحاظ گردد.

$$\text{Min } F = F_1, F_2, F_3, F_4, F_5, g \quad (۴)$$

$$F_1 = \sum_{j=1}^t \sum_{p=1}^m \sum_{k=1}^c (Wt_{jpk} - Av_{jpk})^2 \quad (۵)$$

$$F_2 = \sum_{i=1}^{s-1} \sum_{j=1}^t \sum_{k=1}^c Y_{ijk}(1 - Y_{i+1jk}) \quad (۶)$$

$$F_3 = \sum_{r=1}^{N_{pk}} \sum_{p=1}^m \sum_{k=1}^c M_{rpk} \quad (۷)$$

$$F_4 = \sum_{i=1}^s \sum_{j=1}^t \sum_{k=1}^c Cst_{ijk} \cdot Y_{ijk} \quad (۸)$$

$$F_5 = \sum_{k=1}^c (Act_k \cdot E_{k,idle} + E_k \sum_{i=1}^s \sum_{j=1}^t Y_{ijk}) \quad (۹)$$

$$\sum_{r=1}^{N_{pk}} Z_{ijrpk} = a_{ijp} \cdot Y_{ijk} \quad \forall i, j, p, k \quad (۱۰)$$

$$M_{rpk} \leq \sum_{i=1}^s \sum_{j=1}^t Z_{ijrpk} \quad \forall r, p, k \quad (۱۱)$$

$$M_{rpk} \geq \frac{\sum_{i=1}^s \sum_{j=1}^t Z_{ijrpk}}{s \times t} \quad \forall r, p, k \quad (۱۲)$$

$$\sum_{r=1}^{N_{pk}} \sum_{p=1}^m \sum_{k=1}^c Z_{ijrpk} = 1 \quad \forall i, j \quad (۱۳)$$

$$\sum_{i=1}^s \sum_{j=1}^t \sum_{r=1}^{N_{pk}} \sum_{p=1}^m D_j \cdot mem_{ij} \cdot Z_{ijrpk} \leq MEM_k \quad \forall k \quad (۱۴)$$

$$\sum_{i=1}^s \sum_{j=1}^t \sum_{r=1}^{N_{pk}} \sum_{p=1}^m D_j \cdot cpu_{ij} \cdot Z_{ijrpk} \leq CPU_k \quad \forall k \quad (۱۵)$$

$$\sum_{i=1}^s \sum_{j=1}^t \sum_{r=1}^{N_{pk}} \sum_{p=1}^m D_j \cdot sto_{ij} \cdot Z_{ijrpk} \leq STO_k \quad \forall k \quad (۱۶)$$

$$Wt_{jpk} = \frac{\sum_{i=1}^s \sum_{r=1}^{N_{pk}} D_j \cdot t_{ijp} \cdot Z_{ijrpk}}{T_p} \quad \forall j, p, k \quad (۱۷)$$

$$Av_{jk} = \frac{\sum_{p=1}^m Wt_{jpk}}{\sum_{r=1}^{N_{pk}} \sum_{p=1}^m M_{rpk}} \quad \forall j, k \quad (۱۸)$$

- (۲) حداقل کردن زمان ساخت در تولید سرویس‌دهنده با ساختار جریان کاری به‌منظور کاهش سیکل خدمت‌رسانی
- (۳) به حداقل رساندن کلیه ماشین‌های فیزیکی و مجازی به جهت کاهش تداخلات
- (۴) افزایش سود برای کلیه سودبران و ارائه‌دهندگان سرویس با به حداقل رساندن هزینه انجام کارها
- (۵) کاهش مصرف توان الکتریکی پایگاه‌های داده ابری به جهت نیل به اهداف سبز
- (۶) به جهت آن‌که کارایی سیستم‌ها و کلیه منابع افزایش پیدا کند نیازمند توازن بار سرویس‌دهنده‌ها و ماشین‌های مجازی می‌باشد.
- بهینه شوند و در عین حال محدودیت استفاده از منابع موجود رعایت گردد. حال به‌منظور استخراج یک مدل ریاضی جامع و چندهدفه، تعاریف مربوط به شاخص‌ها، پارامترها و متغیرهای تصمیم در روابط به ترتیب در جداول (۱)، (۲) و (۳) ارائه شده‌اند.

## ۲-۱ بیان رسمی مسئله

بعد از تعریف و شناسائی شاخص‌ها، پارامترها و متغیرهای تصمیم مسئله در روابط (۱) - (۳)، این بخش، به بیان رسمی مسئله زنجیره تأمین ماشین‌های مجازی درخواست شده توسط کاربران که باید توسط ارائه‌دهندگان سرویس‌های ابری ارائه شود به مسئله جایابی ماشین‌های مجازی روی سرویس‌دهنده‌های فیزیکی چکیده‌سازی می‌شود و به بیان رسمی به یک مدل بهینه‌سازی ریاضی فرمول‌بندی می‌شود. هدف آن کمینه‌سازی تابع (۴) است که شامل انواع هزینه‌هاست که

جدول ۲: معرفی پارامترهای استفاده شده در مدل بهینه‌سازی پیشنهادی

پارامترها	
$t_{ijp}$	مدت زمان انجام وظیفه $i$ از کار $j$ بر روی ماشین نوع $p$
$D_j$	تعداد تقاضا از کار $j$
$T_p$	کل مدت زمان در دسترس بودن ماشین مجازی نوع $p$ در تمامی سرویس‌دهنده‌ها
$a_{ijp}$	اگر وظیفه $i$ از کار $j$ به ماشین نوع $p$ نیاز داشته باشد، ۱، و در غیر این صورت صفر می‌باشد
$TE_j$	مدت زمان انتقال کار $j$ بین سرویس‌دهنده‌ها
$N_{pk}$	حداکثر تعداد ماشین مجازی نوع $p$ که در سرویس‌دهنده $k$ می‌تواند وجود داشته باشد
$SC_{ij}$	اندازه حجم کار وظیفه $i$ از کار $j$
$SD_{ij}$	اندازه داده وظیفه $i$ از کار $j$
$DTI_k$	هزینه انتقال ورود داده به سرویس‌دهنده $k$ (هزینه در مگابایت)
$DTO_k$	هزینه انتقال خروج داده از سرویس‌دهنده $k$ (هزینه در مگابایت)
$Com_k$	هزینه محاسبات در سرویس‌دهنده $k$ (هزینه در میلیون دستور اجرا شده)
$Str_k$	هزینه ذخیره‌سازی در سرویس‌دهنده $k$ (هزینه در مگابایت)
$Bg_j$	بودجه برای انجام کار $j$
$cpu_{ij}$	میزان پردازش مورد نیاز برای انجام وظیفه $i$ از کار $j$
$mem_{ij}$	میزان حافظه مورد نیاز برای انجام وظیفه $i$ از کار $j$
$sto_{ij}$	میزان فضای ذخیره‌سازی مورد نیاز برای انجام وظیفه $i$ از کار $j$
$CPU_k$	ظرفیت پردازشی سرویس‌دهنده $k$
$MEM_k$	ظرفیت حافظه سرویس‌دهنده $k$
$STO_k$	ظرفیت فضای ذخیره‌سازی سرویس‌دهنده $k$
$E_{k,max}$	بیشینه مصرف انرژی سرویس‌دهنده $k$
$E_{k,idle}$	مصرف انرژی ثابت در سرویس‌دهنده $k$
$E_k$	مصرف انرژی پویا در سرویس‌دهنده $k$
$ES_k$	انرژی شروع/خاتمه سرویس‌دهنده $k$

(۲)

$$T_{i(i+1)j} = \sum_{k=1}^c Y_{ijk}(1 - Y_{i+1jk}).TE_j \quad \forall i, j \quad (19)$$

$$gs_{i+1j} - gs_{ij} \geq t_{ijp} + T_{i(i+1)j} \quad \forall i, j, p \quad (20)$$

$$gs_{lh} - gs_{ij} + M(1 - W_{ijlh}) + M(1 - H_{ijlhrpk}) \geq t_{ihp} \quad \forall i, j, l, h, r, p, k \text{ \& } i \neq l, j \neq h \quad (21)$$

$$gs_{ij} - gs_{lh} + M.W_{ijlh}) + M(1 - H_{ijlhrpk}) \geq t_{ijp} \quad \forall i, j, l, h, r, p, k \text{ \& } i \neq l, j \neq h \quad (22)$$

$$W_{ijlh} + W_{lhij} = H_{ijlhrpk} \quad \forall i, j, l, h, r, p, k \text{ \& } i \neq l, j \neq h \quad (23)$$

$$W_{ijlh} + W_{lhuv} \leq W_{ijuv} + 1 \quad \forall i, j, l, h, u, v \text{ \& } i \neq l \neq u, j \neq h \neq v \quad (24)$$

$$gs_{ij} \geq t_{ijp} \quad \forall i, j, p \quad (25)$$

$$gt_j \geq gs_{ij} \quad \forall i, j \quad (26)$$

$$Cst_{ijk} = cpu_{ij} \cdot Com_k + sto_{ij} \cdot Str_k + mem_{ij} \cdot (DTI_k + DTO_k) \quad \forall i, j, k \quad (27)$$

$$\sum_{k=1}^c \sum_{i=1}^s Cst_{ijk} \cdot Y_{ijk} \leq Bg_j \quad \forall j \quad (28)$$

$$\sum_{i=1}^s \sum_{j=1}^t Y_{ijk} \cdot E_k \leq E_{k,max} \cdot Act_k - E_{k,idle} - ES_k \quad \forall k \quad (29)$$

$$\sum_{k=1}^c Act_k \geq \left\lceil \frac{\sum_{k=1}^c E_{k,idle} + ES_k}{E_{k,max}} \right\rceil \quad (30)$$

$$gs_{ij}, gt_j, g, Cst_{ijk} \geq 0 \quad (31)$$

$$Y_{ijk}, Z_{ijrpk}, W_{ijst}, H_{ijstrpk}, Act_k, M_{rpk} \in \{0,1\} \quad (32)$$

همان‌گونه که در روابط فوق‌الذکر بیان گردیده است، تابع نهایی خود به تنهایی از شش عبارت تشکیل می‌گردد که کلیه آن‌ها در معادلات (۵) تا (۹) مشاهده می‌گردند. توازن بار سرویس‌دهنده‌ها در اولین عبارت قابل مشاهده است که با استفاده از روش واریانس، می‌توان مقدار عدم تعادل بار یکپارچه در سرویس‌دهنده‌ها را محاسبه نمود. تعداد انتقال‌های میان سرویس‌دهنده‌ها در عبارت دوم محاسبه گردیده است که در صورت انجام این انتقال‌ها

هزینه‌های ارتباطی افزایش خواهد یافت. تعداد ماشین‌های مجازی که به صورت فعال در سیستم وجود دارند توسط عبارت سوم نشان داده می‌شود. هزینه کلیه وظایفی که در کلیه سرویس‌دهنده‌ها اجرا می‌شوند، از طریق عبارت چهارم قابل استخراج می‌باشد. این نکته لازم به ذکر است که کلیه هزینه‌های محاسبات و ذخیره‌سازی متناسب



جدول ۳: معرفی متغیرهای تصمیم استفاده شده در مدل بهینه‌سازی پیشنهادی

متغیرهای تصمیم	
$Y_{ijk}$	اگر وظیفه $i$ از کار $j$ در سرویس دهنده $k$ انجام شود، یک، در غیر این صورت صفر.
$M_{rpk}$	ماشین شماره $r$ از نوع $p$ که در سرویس دهنده $k$ تخصیص داده شده فعال باشد، یک، و در غیر این صورت صفر.
$Z_{ijrpk}$	اگر وظیفه $i$ از کار $j$ به ماشین شماره $r$ از نوع $p$ در سرویس دهنده $k$ تخصیص داده شود، یک، و در غیر این صورت صفر.
$W_{ijlh}$	اگر وظیفه $i$ از کار $j$ زودتر از وظیفه $l$ از کار $h$ انجام شود، یک، در غیر این صورت صفر.
$H_{ijlhrpk}$	اگر وظیفه $i$ از کار $j$ و وظیفه $l$ از کار $h$ به ماشین شماره $r$ از نوع $p$ در سرویس دهنده $k$ تخصیص داده شود، یک، در غیر این صورت صفر.
$Act_k$	اگر سرویس دهنده $k$ استفاده شود، یک، در غیر این صورت صفر.
$Wt_{jpk}$	بار کار $j$ روی ماشین نوع $p$ در سرویس دهنده $k$
$Av_{jk}$	متوسط بار $j$ روی تمام ماشین‌های سرویس دهنده $k$
$gs_{ij}$	زمان تکمیل وظیفه $i$ از کار $j$
$gt_j$	زمان تکمیل کار $j$
$g$	فاصله زمانی ساخت یا پیشینه زمان تکمیل تمام کارها
$T_{i(i+1)j}$	زمان انتقال دو وظیفه متوالی از یک کار
$Cst_{ijk}$	هزینه انجام وظیفه $i$ از کار $j$ در سرویس دهنده $k$
$F_1$	تابع هدف اول (توازن بار)
$F_2$	تابع هدف دوم (هزینه ارتباطات بین وظایف در کارها)
$F_3$	تابع هدف سوم (حداقل سازی ماشین‌های فعال)
$F_4$	تابع هدف چهارم (هزینه اجرای کارها)
$F_5$	تابع هدف پنجم (توان الکتریکی مصرفی)

(۳)

مشخص گردیده است. هدف مهم ششم، کمینه کردن این مقدار حداکثر است. هدف نهائی ارائه یک راه حل کارآمد جهت بهینه‌سازی همزمان این شش عبارت در تابع نهایی منوط به این که محدودیت‌های مسئله حفظ شوند.

محدودیت (۱۰): تعریف متغیر  $Z_{ijrpk}$  طی این معادله مشخص گردیده است و بیانگر آن است، هنگامی وظیفه  $i$  از کار  $j$  امکان این را دارد که بر روی ماشین شماره  $r$  از نوع  $p$  در یک سرویس دهنده  $k$  انجام پذیرد که ابتدا وظیفه مربوطه در سرویس دهنده  $k$  صورت پذیرد و ثانیاً به ماشین نوع  $p$  نیاز وجود داشته باشد.

محدودیت‌های (۱۱) و (۱۲): این معادلات نشان دهنده این است که ماشین مجازی فعال می‌باشد چنانچه حداقل یک کار به هر یک از ماشین‌ها اختصاص داده شود.

محدودیت (۱۳): هر وظیفه از هر کار تنها به یک نوع ماشین و در یک سرویس دهنده اختصاص داده می‌شود که این عبارت بیانگر آن است.

محدودیت (۱۴): به منظور جلوگیری استفاده خارج از ظرفیت حافظه سرویس دهنده‌ها این عبارت مورد استفاده واقع می‌گردد. یعنی مجموع کلیه حافظه‌های درخواستی ماشین‌های مجازی محدود به ظرفیت حافظه مرکز داده  $k$  است.

محدودیت (۱۵): به منظور جلوگیری از استفاده خارج از ظرفیت پردازشی سرویس دهنده‌ها این عبارت مورد استفاده واقع می‌گردد. یعنی مجموع کلیه پردازش‌های درخواستی ماشین‌های مجازی حداکثر می‌تواند برابر با ظرفیت پردازشی مرکز داده  $k$  باشد.

محدودیت (۱۶): به منظور جلوگیری از استفاده خارج از ظرفیت فضای ذخیره‌سازی سرویس دهنده‌ها این عبارت مورد استفاده واقع می‌گردد. یعنی مجموع کلیه ظرفیت فضای ذخیره‌سازی درخواستی حداکثر می‌تواند برابر با ظرفیت فضای ذخیره‌سازی مرکز داده  $k$  باشد.

محدودیت (۱۷): مجموع بار وظایف  $i \in \{1, \dots, S\}$  از کار  $j$  بر روی کل ماشین‌های فعال  $r$  از نوع  $p$  در سرویس دهنده

با ظرفیت پایگاه‌های داده ابری و ترافیک شبکه متغیر می‌باشد. سرویس دهنده‌های روشن مصرف انرژی قابل ملاحظه‌ای دارند که این مقدار توسط عبارت پنجم قابل محاسبه می‌باشد. هزینه مصرف انرژی خنک‌کننده‌ها در سراسر سرویس دهنده‌ها و تجهیزات ارتباطی و شبکه در پایگاه‌های داده به صورت مستهلک می‌باشند و هزینه آن‌ها در معادلات آورده نخواهد شد. حداکثر زمان مورد نیاز به منظور انجام کارها که با عبارت  $g$  در معادله (۴)

$k$  توسط این عبارت محاسبه خواهد گردید. میزان بار ماشین‌ها بر طبق فرمول (نیاز)/(توان) و یا (زمان مورد نیاز به منظور پردازش/زمان در دسترسی از یک ماشین) بررسی و محاسبه می‌گردد. لازم به ذکر است جمع کلیه زمان لازم به منظور پردازش وظیفه‌های تخصیص به کلیه ماشین‌های نوع  $p$  که در سرویس‌دهنده  $k$  وجود دارند به وسیله صورت کسر معادلات فوق محاسبه می‌گردند.

محدودیت (۱۸): این عبارت در خصوص متوسط زمان پردازش درون سرویس‌دهنده‌ها را برای کار  $z$  بر روی کلیه ماشین‌ها در داخل سرویس‌دهنده  $k$  محاسبه می‌کند. به عبارت دیگر، از معادله مذکور امکان استخراج و محاسبه راندمان یک سرویس‌دهنده همانند عبارت (۱۷) امکان پذیر است.

محدودیت (۱۹): این عبارت بیانگر مدت زمان مورد نیاز به منظور انجام عملیات انتقال دو وظیفه متوالی  $i$  و  $i+1$  از کار  $z$  است.

محدودیت (۲۰): کلیه اولویت‌های لازم به جهت انجام کلیه وظایف در هنگام پردازش در ماشین نوع  $p$  توسط این معادله محاسبه خواهد گردید. در معادله مذکور مقدار اختلاف زمان تکمیل وظیفه  $i$  و  $i+1$  از کار  $z$  می‌بایست حداقل برابر با مجموع مدت زمان پردازش و مدت زمان انتقال وظیفه  $i$  از کار  $z$  باشد. به بیان دیگر، وظیفه  $i+1$  امکان آن‌که پیش از وظیفه  $i$  تکمیل شود وجود نخواهد داشت.

محدودیت‌های (۲۱) و (۲۲): اگر دو وظیفه  $i$  از کار  $z$  و وظیفه  $a$  از کار  $h$  هر دو بر روی ماشین شماره  $r$  از نوع  $p$  در سرویس‌دهنده  $k$  به انجام برسند، توالی انجام هر یک از کارها بر روی ماشین‌های مجازی مطابق مدت زمانی مصرفی آن است که هر یک از وظایف براساس تقدم ورود آن‌ها می‌باشد.

محدودیت (۲۳): چنانچه وظایف  $i$  و  $a$  از کارهای  $z$  و  $h$  هر دو بر روی یک ماشین شماره  $r$  از نوع  $p$  در سرویس‌دهنده  $k$  انجام شوند ( $H_{ijhrpk} = 1$ )، آنگاه یکی از وظایف  $i$  و  $a$  از کارهای  $z$  و  $h$  زودتر از دیگری انجام خواهد شد. به بیانی دیگر فقط یکی از عبارات  $W_{ijh} = 1$  یا  $W_{lhn} = 1$  معتبر خواهند بود.

محدودیت (۲۴): کلیه کارهای مربوط به یک ماشین در یک صف صورت خواهد گرفت که این موضوع طبق رابطه ارائه شده محاسبه می‌گردد و رابطه سه گانه در تقدم کارهایی که روی یک ماشین انجام می‌شود را نشان می‌دهد.

محدودیت (۲۵): کمترین زمان مورد نیاز به منظور تکمیل یک وظیفه برابر با زمان انجام آن وظیفه می‌باشد که این امر توسط رابطه مذکور بیان گردیده است.

محدودیت (۲۶): مدت زمان مورد نیاز به منظور اتمام یک وظیفه از طریق این رابطه بیان می‌شود، بدین معنی که زمان تکمیل کار  $z$  باید حداقل برابر با زمان تکمیل وظیفه آن باشد.

محدودیت (۲۷): مدت زمان مورد نیاز به منظور تکمیل هر یک از کارها کمتر از فاصله زمانی ساخت آن می‌باشد.

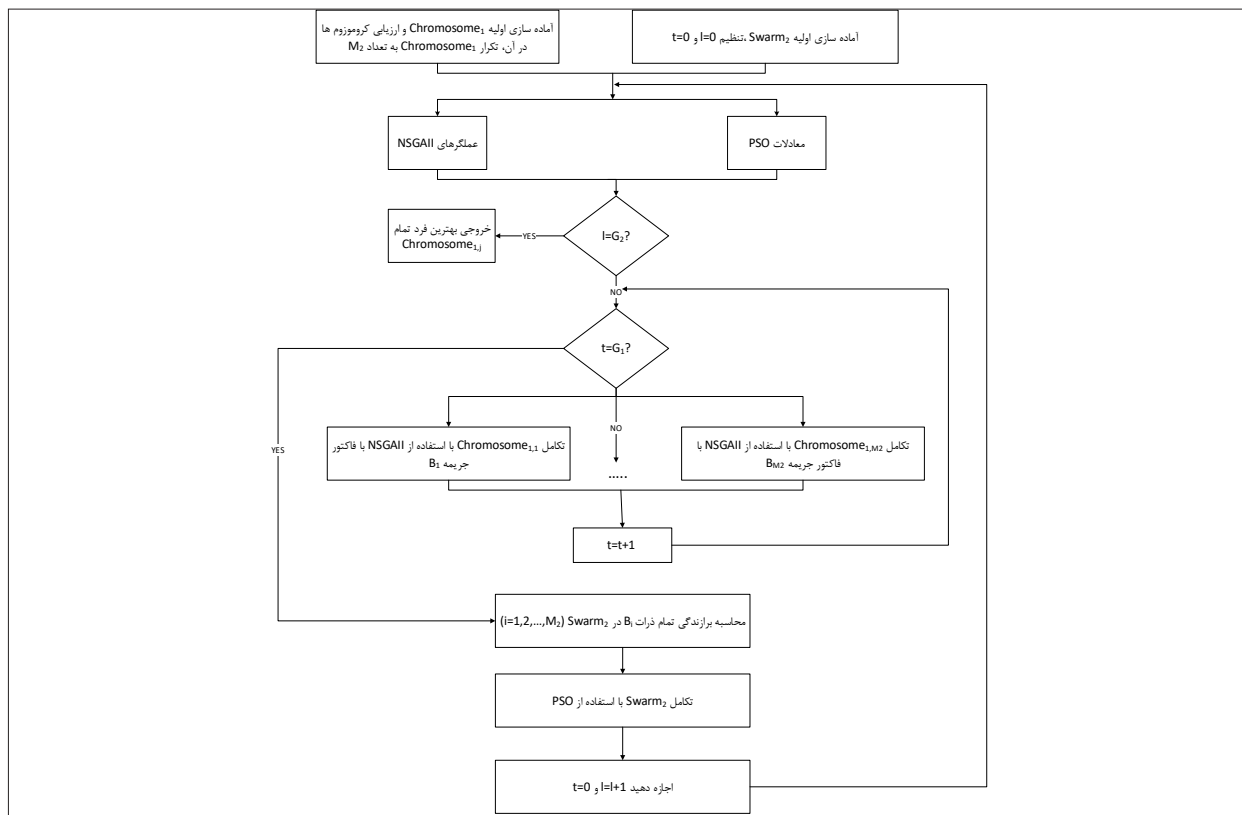
محدودیت (۲۸): هزینه‌های محاسبات، ذخیره‌سازی و انتقال داده در محیط رایانش ابری همواره توسط ارائه‌دهنده سرویس دریافت خواهد گردید. از آنجایی که هزینه انتقال اطلاعات بین پایگاه‌های داده ابری بسیار ناچیز است، در عبارت فوق به صورت صفر بیان گردیده است.

محدودیت (۲۹): به منظور آن‌که کلیه هزینه‌های انجام شده به جهت اتمام کلیه وظایف نباید بیش از بودجه تعیین شده باشد از این عبارت استفاده می‌گردد. به عبارت دیگر این عبارت به منظور کنترل بودجه می‌باشد.

محدودیت (۳۰): برای هر کدام از پایگاه‌های داده ابری یک مقدار ماکزیم انرژی وجود خواهد داشت که با عبارت  $E_{k,max}$  نشان داده می‌شود و امکان این‌که مصرف انرژی از این مقدار فراتر رود وجود نخواهد داشت. که انجام عملیات پردازش در ماشین‌های مجازی با توجه به ظرفیت باقی مانده انجام می‌پذیرد.

محدودیت‌های (۳۱) و (۳۲): این دو عبارت محدوده و انواع پارامترها را ارائه می‌کند و عباراتی واضح و بدیهی می‌باشند.





شکل ۱: روندنما الگوریتم بهینه‌سازی پیشنهادی

چند هدفه مقید استفاده خواهند شد. به منظور درک هرچه بهتر الگوریتم بهینه‌سازی پیشنهادی، روندنما الگوریتم بهینه‌سازی ترکیبی NSGAII-PSO در شکل (۱) نمایش داده شده است.

#### ۴. شبیه‌سازی و ارزیابی نتایج

به منظور اعتبارسنجی مدل ریاضی ارائه شده و ارزیابی عملکرد الگوریتم بهینه‌سازی ترکیبی پیشنهادی، محاسبات جهت تحلیل و بررسی عملکرد با استفاده از تعریف مسائل تصادفی در مقیاس‌های مختلف انجام می‌شود. پارامترهای مسائل با استفاده از توزیع یکنواخت انتخاب می‌شوند و همچنین با بزرگ شدن ابعاد مسائل زمان توقف افزایش می‌یابد. پیاده‌سازی مدل و الگوریتم بهینه‌سازی پیشنهادی، به وسیله نرم‌افزار MATLAB R2020b کد شده و بر روی یک کامپیوتر اینتل CPU 60.1 GHz Core i5 با حافظه اصلی ۸ گیگابایت اجرا شده است. از آنجائی که مسئله زنجیره

#### ۳. الگوریتم بهینه‌سازی پیشنهادی

در این مقاله، با توجه به پیچیدگی مسئله، از تلفیق الگوریتم‌های ژنتیک مرتب‌سازی نامغلوب نسخه دوم (NSGAII) و الگوریتم بهینه‌سازی ازدحام ذرات (PSO) یک الگوریتم بهینه‌سازی ترکیبی ساخته می‌شود که این ترکیب به صورت یک الگوریتم فراابتکاری می‌باشد و برای حل مسئله بهینه‌سازی بیان شده ارائه و اجرا می‌شود. با توجه به ماهیت گسسته مسائل زمان‌بندی و همچنین با توجه به این‌که مدل ریاضی این مقاله از نوع چند هدفه می‌باشد، استفاده از الگوریتم داخلی ژنتیک به حل بهینه این مسئله بیش از پیش کمک خواهد کرد. از طرف دیگر در بحث مقیدسازی و محدودسازی که از طریق مفاهیم تابع جریمه انجام خواهد پذیرفت، تنظیم فاکتورهای جریمه می‌بایست توسط الگوریتم بیرونی بهینه‌سازی ذرات انبوه صورت پذیرد. الگوریتم‌های مذکور به صورت تعاملی و موازی با همدیگر برای حل مسائل بهینه‌سازی

تأمین ماشین‌های مجازی بیان شده در محیط ابر و الگوریتم پیشنهادی جهت حل آن به صورت چند هدفه ارائه شده‌اند، به منظور ارزیابی قابل اعتماد، روش پیشنهادی با دو روش موفق در حل مسائل بهینه‌سازی چند هدفه در حوزه مهندسی مقایسه می‌شود. روش اول، الگوریتم بهینه‌سازی چند هدفه ازدحام ذرات<sup>۲</sup> (MOPSO) است که حسینی شیروانی نسخهٔ دوهدفه آن را برای مسئله بهینه‌سازی دوهدفه جهت حل ترکیب و سرویس در محیط چند ابری سفارشی کرده است [۱۵]. این مقاله نیز روش بیان شده را برای مسئله زنجیره تأمین سفارشی می‌کند. روش دوم، الگوریتم بهینه‌سازی چند هدفه ژنتیک نسخهٔ ۲ (NGGAI) است که برای حل مسائل بهینه‌سازی چند هدفه در حوزه مهندسی کاربرد موفق داشته است [۱۶]. هر دو روش با توجه به مسئله زنجیره تأمین بیان شده تطبیق داده می‌شوند و تمام شبیه‌سازی‌ها در یک محیط یکسان و روی داده‌های یکسان انجام می‌شوند تا نتایج قابل اعتمادی حاصل شود.

نحوه انتخاب ابعاد مسئله مورد بحث در پژوهش حاضر، با توجه به سه متغیر اصلی نوع کارها، ماشین‌های مجازی و سرویس‌دهنده‌ها در انتخاب ابعاد مسئله اثرگذار می‌باشند و سبب سختی و پیچیدگی هرچه بیشتر آن می‌شوند. تعداد کارها به صورت تصادفی با توزیع نرمال عددی بین ۲ الی ۵۰ کار تولید می‌شوند؛ تعداد سرویس‌دهنده‌ها بین ۲ تا ۶ و ماشین‌های مجازی بین ۳ الی ۲۰ قابل تغییر می‌باشند. به منظور مقایسه بهتر، ابتدا مسئله حاضر را در مقیاس کوچک حل کرده و سپس آن را به ۲۰ مسئله مقیاس بزرگ‌تر که در هر یک از آن‌ها متغیرها به نوبت تغییر داده می‌شوند تعمیم داده خواهد شد.

#### ۴-۱ مسائل با مقیاس کوچک

همان‌طور که اشاره شد، به منظور ارزیابی مدل و الگوریتم بهینه‌سازی پیشنهادی در حالت اول، سیستم‌های رایانش ابری با اندازه نسبتاً کوچک که در قسمت قبل دامنه تغییرات اندازه مسئله نیز ذکر گردیده است، در نظر گرفته می‌شوند.

لذا در حالت اول، یکی از شرکت‌های ارائه‌دهنده رایانش ابری

2- Multi-objective Particle Swarm Optimization (MOPSO)

با دو پایگاه داده که سه نوع ماشین مجازی بر روی آن‌ها می‌باشد در نظر گرفته شده است. به منظور دستیابی به نتیجه فرض بر آن است که در این دو سرویس‌دهنده، سه کار، که هر کدام از سه وظیفه تشکیل شده است وارد محیط ابر می‌شوند به همین خاطر اندازه مسئله  $2 \times 3 \times 3$  می‌باشد و مدت زمان لازم به منظور پردازش هر وظیفه در این مسئله نمونه در جدول (۴) آمده است. جداول (۵) تا (۸) بیانگر مدت زمانی که هر ماشین در دسترس می‌باشد و مدت زمان مورد نیاز به منظور انتقال هر کار میان پایگاه‌های داده و همچنین میزان ظرفیت منابع محاسباتی سرویس‌دهنده‌ها و همچنین میزان منابع محاسباتی مورد نیاز هر وظیفه از هر کار شامل حافظه، قدرت پردازشی و فضای ذخیره‌سازی آمده است. جدول شماره (۹) بیانگر ماتریس اولیه کار - ماشین مجازی می‌باشد. به عنوان مثال، این جدول نشان می‌دهد، وظایف ۱، ۲ و ۳ از کار ۱ به ترتیب به ماشین‌های مجازی نوع ۱، ۳ و ۲ نیاز دارند. در ضمن، جداول (۱۰)، (۱۱) و (۱۲) مربوط به هزینه‌های مختلف هستند که به ترتیب هزینه رسانه ذخیره‌سازی، اجرا و انتقال داده از/به ابر در جدول (۱۰)، بودجه مالی اتمام کار در جدول (۱۱) و میزان ظرفیت، مصرف انرژی و حداکثر انرژی در جدول (۱۲) درج شده‌اند.

حال با توجه به مدل پیشنهاد شده به منظور مدیریت منابع و زمانبندی کارها در یک زنجیره تأمین در فضای ابری و نیز الگوریتم بهینه‌سازی چندهدفه ترکیبی NSGAI-PSO که در بخش‌های قبل به طور مفصل تشریح شده است، بر اساس مسئله نمونه مطرح شده در جداول (۴) تا (۱۲)، پیاده‌سازی شده و در ادامه نتایج حاصل از این شبیه‌سازی عددی ارائه شده است. جدول (۱۳)، ماتریس تخصیص کارها، ماشین‌ها و سرویس‌دهنده‌ها را نشان می‌دهد.

نکته مهم در حل مسائل بهینه‌سازی چند هدفه، اهمیت اهداف مختلف در سیستم است که می‌تواند از دید توسط طراح سیستم متغیر باشد. برای حل مسئله چند هدفه بیان

جدول ۴: زمان بندی پردازش‌ها

نوع ماشین کار /وظیفه	نوع (۳)			نوع (۲)			نوع (۱)		
	وظیفه (۱)	وظیفه (۲)	وظیفه (۳)	وظیفه (۱)	وظیفه (۲)	وظیفه (۳)	وظیفه (۱)	وظیفه (۲)	وظیفه (۳)
کار (۱)	۵	۱	۳	۲	۱	۴	۳	۴	۵
کار (۲)	۴	۳	۴	۲	۲	۳	۴	۴	۴
کار (۳)	۵	۲	۲	۴	۴	۴	۳	۳	۴

جدول ۶: زمان انتقال کارها بین سرویس دهنده‌ها

کار (۱)	کار (۲)	کار (۳)	زمان انتقال بین سرویس دهنده‌ها
۵	۳	۴	

جدول ۸: میزان منابع محاسباتی مورد نیاز کارها

منابع کار/وظیفه	پردازنده			حافظه			فضای ذخیره‌سازی		
	وظیفه (۱)	وظیفه (۲)	وظیفه (۳)	وظیفه (۱)	وظیفه (۲)	وظیفه (۳)	وظیفه (۱)	وظیفه (۲)	وظیفه (۳)
کار (۱)	۱۵	۱۳	۱۲	۰,۲۰۰	۰,۳۰۰	۰,۵۰۰	۵	۵	۵
کار (۲)	۱۰	۱۵	۱۵	۰,۲۰۰	۰,۱۰۰	۰,۴۰۰	۷	۸	۲
کار (۳)	۱۴	۱۰	۲۰	۰,۲۰۰	۰,۴۰۰	۰,۲۰۰	۵	۵	۸

جدول ۱۰: هزینه‌های ذخیره‌سازی، اجرا و انتقال داده از/به سرویس دهنده‌ها

هزینه / سرویس دهنده	سرویس دهنده (۲)	سرویس دهنده (۱)
ذخیره‌سازی (MBS/\$)	۰,۱۴۰	۰,۲۶۰
خروج داده از (MBS/\$)	۰,۰۹	۰,۰۵
ورود داده به (MBS/\$)	۰,۰۹۰	۰,۰۸۵

جدول ۱۲: میزان مصرف ثابت انرژی و ظرفیت (ماکزیمم) مصرف انرژی سرویس دهنده‌ها

مصرف انرژی / سرویس دهنده	سرویس دهنده (۲)	سرویس دهنده (۱)
مصرف انرژی در حال حاضر	۹۷	۸۶
حداکثر ظرفیت (کیلووات ساعت)	۲۰۰	۴۹۴
در حالت ایده آل (کیلووات ساعت)	۴۰	۶۷
انرژی مصرفی	۲۹	۳۶

مد نظر قرار می‌گیرند. از آنجائی که فرض کردیم تمام اهداف در سیستم دارای اهمیت یکسانی هستند مقادیر ضرایب  $w_1$  الی  $w_6$  همگی برابر ۰,۱۷ مقداردهی می‌شوند. جدول (۱۴)، حل مدل بهینه‌سازی چند هدفه ترکیبی (NSGII-PSO) را برای مسئله بیان شده به تفکیک توابع هدف ششگانه نشان می‌دهد. همان‌طور که اطلاعات جدول ۱۴، نشان می‌دهد الگوریتم پیشنهادی ترکیبی NSGII-PSO از لحاظ رتبه‌بندی نهایی که بازتاب توزین اهمیت اهداف است، نسبت به سایر روش‌ها برتری دارد و به حالت برجسته نمایش داده شده است.

جدول ۵: مدت زمان در دسترس بودن ماشین‌ها

ماشین نوع (۳)	ماشین نوع (۲)	ماشین نوع (۱)	زمان دسترس پذیری
۱۱	۱۳	۱۲	

جدول ۷: میزان ظرفیت منابع محاسباتی سرویس دهنده‌ها

ظرفیت / سرویس دهنده	سرویس دهنده (۲)	سرویس دهنده (۱)
حافظه (گیگابایت)	۵۰	۹۰
فضای ذخیره‌سازی (گیگابایت)	۸۰۰۰	۱۲۰۰۰
پردازنده مجازی (EC2)	۱۵۰	۱۲۰

جدول ۹: نوع ماشین‌های مورد نیاز برای انجام کارها

کار /وظیفه	وظیفه (۳)	وظیفه (۲)	وظیفه (۱)
کار (۱)	۲	۳	۱
کار (۲)	۳	۱	۲
کار (۳)	۱	۳	۲

جدول ۱۱: بودجه انجام کارها

کار (۱)	کار (۲)	کار (۳)	بودجه (\$)
۲	۳	۳	

جدول ۱۳: ماتریس تخصیص کارها، ماشین‌ها و سرویس دهنده‌ها

کار/وظیفه	سرویس دهنده			نوع ماشین			شماره ماشین
	وظیفه (۱)	وظیفه (۲)	وظیفه (۳)	وظیفه (۱)	وظیفه (۲)	وظیفه (۳)	
کار (۱)	۱	۲	۱	۱	۲	۲	۳
کار (۲)	۲	۲	۲	۳	۱	۳	۳
کار (۳)	۲	۲	۲	۳	۲	۱	۴

شده، تمام اهداف ششگانه را برابر در نظر می‌گیریم. از آنجائی که قرار است کارکرد الگوریتم ترکیبی پیشنهادی را در برابر دو الگوریتم بهینه‌ساز چند هدفه MOPSO و NSGII بررسی کنیم، برای این منظور تابع رتبه‌بندی جدیدی در (۳۳) تعریف می‌کنیم و با توجه به کمینه‌سازی تابع اصلی هرچه مقدار این تابع رتبه‌بندی کمتر باشد برتری روش مورد نظر را نشان می‌دهد.

$$Score = w_1 \times F_1 + w_2 \times F_2 + w_3 \times F_3 \quad (33)$$

$$+ w_4 \times F_4 + w_5 \times F_5 + w_6 \times g$$

ضرایب  $w_1$  الی  $w_6$  به‌منظور اهمیت هدف مورد مطالعه

جدول ۱۴: مقادیر بهینه توابع هدف

نمره نهایی رتبه‌بندی	میزان کل مصرف انرژی	هزینه کل انجام کارها	بیشینه زمان انجام کارها	تعداد ماشین‌های مجازی فعال	اختلاف بار سرویس‌دهنده	تعداد انتقال بین سرویس‌دهنده	هدف
							الگوریتم
۹۹۹۹	۴۲۹	۵۸۳۶۷	۱۷	۸	۰,۰۸۹۲	۲	NSGAI-PSO
۱۰۰۷۶	۴۴۰	۵۸۸۰۰	۱۷	۸	۰,۰۹۰	۲	MOPSO
۱۰۰۹۴	۴۵۰	۵۸۹۰۰	۱۷	۹	۰,۰۹۵	۲	NSGAI

#### ۴-۴ مسائل با مقیاس‌های مختلف

همان‌طور که مشاهده شد، در بخش قبل، به‌منظور ارائه یک ارزیابی اولیه از مدل پیشنهادی و الگوریتم بهینه‌سازی ترکیبی، یک مسئله نسبتاً کوچک و نمونه که برگرفته از یک مسئله واقعی می‌تواند باشد، در نظر گرفته شده و بر اساس پارامترهای مربوط به این مسئله، نتایج حاصل از حل بهینه مدل پیشنهادی استخراج و در جداول (۱۳) و (۱۴) ارائه شده است. حال در ادامه ارزیابی مدل و الگوریتم بهینه‌سازی پیشنهادی، در این بخش از مقاله حاضر، روش پیشنهادی بر روی مسائل با مقیاس‌های مختلف (نسبتاً کوچک و بزرگ) اجرا گردیده است. برای هر یک از مسائل تولید شده، هر یک از الگوریتم‌ها پانزده بار اجرا گردیده، نتایج به صورت میانگین مقادیر حاصل از این اجراها بیان گردیده است. جدول (۱۵) پارامترهای مسائل و همچنین پاسخ‌های بهینه به‌دست آمده از حل مدل پیشنهادی توسط الگوریتم بهینه‌سازی-NSGAI-PSO، در ۲۰ سناریوی مختلف نشان می‌دهد.

برای ارزیابی دقیق عملکرد الگوریتم پیشنهادی بهینه‌سازی-NSGAI-PSO، در حل مسئله زنجیره تأمین با مقیاس‌های مختلف در برابر الگوریتم‌های بهینه‌ساز چند هدفه موفق NSGAI و MOPSO مقدار تابع رتبه‌بندی جدید را برای هر یک از الگوریتم‌های رقابتی در ۲۰ سناریوی مختلف در جدول ۱۶، گزارش می‌شود. این تابع رتبه‌بندی بازتابی از توزیع اهداف در راه حل ارائه شده است. مقدار کمینه به معنای این است که راه حل ارائه شده به‌طور هوشمندانه توابع هدف را به‌طور متوسط کمینه سازی کرده است.

همان‌طور که اطلاعات جدول ۱۶ نشان می‌دهد الگوریتم پیشنهادی بر سایر الگوریتم‌ها از لحاظ مقدار تابع رتبه‌بندی برتری دارد که این تابع بازتاب پرداختن همزمان به کل

اهداف است. بعد از الگوریتم پیشنهادی الگوریتم MOPSO و NSGAI در رتبه‌های بعدی قرار دارند. نکته قابل توجه سرعت و انعطاف بالای الگوریتم PSO است که برتری آن نسبت به الگوریتم ژنتیک محسوس است. الگوریتم ترکیبی ویژگی‌های موثر هر یک از الگوریتم‌های ژنتیک و ازدحام ذرات را به ارث می‌برد.

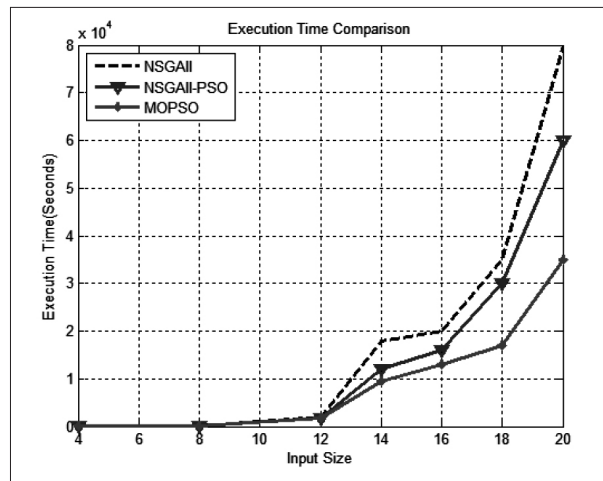
هدف بعدی الگوریتم‌های بهینه‌سازی دستیابی به جواب مطلوب در کوتاه‌ترین و قابل قبول‌ترین زمان ممکن است که این دو متغیر به‌عنوان معیاری مهم به‌منظور مقایسه و نتیجه‌گیری می‌باشند. اوزان تمام هدف‌ها در این مسئله به صورت برابر با یکدیگر در نظر گرفته شده است. مدت زمان مورد نیاز به‌منظور محاسبه توابع به صورت غیرخطی بسیار بیشتر از مدت زمان مورد نیاز در حالت خطی می‌باشد. به همین منظور نتایج به‌دست آمده از الگوریتم فراابتکاری در خصوص پیدا کردن جواب بهینه مسئله قابل قبول می‌باشد و مدت زمان دستیابی به جواب بهینه متناسب با افزایش ابعاد مسئله افزایش نامحسوسی را به خود می‌بیند که این امر سرعت تصمیم‌گیری به‌منظور تخصیص منابع و زمان‌بندی کارها در محیط رایانش ابری به میزان قابل توجهی افزایش خواهد داد. نمودار تغییرات زمان محاسباتی نمونه مسائل حل شده، در شکل (۲) نشان داده شده است.

همان‌گونه که در شکل (۲) نشان داده شده است، با توجه به رفتار الگوریتم پیشنهادی NSGAI-PSO، با افزایش تعداد تکرارها و جمعیت محلی الگوریتم درونی (الگوریتم ژنتیک مرتب‌سازی نامغلوب) و همچنین متناسب با آن، با کاهش همین تعداد تکرار و جمعیت از الگوریتم بیرونی (الگوریتم بهینه‌سازی ذرات انبوه)، مدت زمان دستیابی به

جدول ۱۵: نتایج حاصل از ارزیابی مدل و الگوریتم بهینه‌سازی پیشنهادی ترکیبی NSGAI-PSO در حل مسائل مقیاس‌های کوچک و بزرگ

شماره سناریو	تعداد کار	تعداد ماشین	تعداد سرویس‌دهنده	مقادیر بهینه توابع هدف				
				F1	F2	F3	F4	F5
۱	۳	۳	۲	۰,۳۶۴	۲	۸	۵,۲۰	۴۱۲
۲	۴	۲	۲	۰,۶۵۳	۲	۶	۵,۳۸	۴۲۳
۳	۳	۴	۲	۰,۴۳	۴	۷	۵,۷۳	۴۳۰
۴	۴	۴	۲	۰,۴۵	۲	۸	۴,۹۵	۴۸۸
۵	۴	۵	۲	۰,۱۰۰۶	۱	۱۰	۵,۵۵۶	۵۰۱
۶	۵	۵	۲	۰,۳۴۴۲	۳	۱۲	۶,۳۳۴	۵۴۳
۷	۵	۷	۲	۰,۴۷۷۸	۳	۱۵	۶,۷۷۸	۷۸۹
۸	۶	۷	۲	۰,۵۵	۴	۱۶	۸,۵۱۲	۸۹۳
۹	۶	۸	۲	۰,۶۶۸۷	۸	۱۸	۱۰,۰۱	۱۱۴۲
۱۰	۷	۸	۳	۰,۹۱۲۳	۱۰	۲۰	۹,۶۶۵	۱۴۷۶
۱۱	۸	۸	۳	۱,۸۸۳۲	۸	۲۱	۱۱,۰۰۳	۱۶۷۴
۱۲	۱۰	۸	۳	۷,۴۳۵۴	۲۷	۳۳	۶,۶۶۵	۱۷۴۳
۱۳	۱۵	۱۰	۳	۱۷,۸۸۹	۴۰	۵۳	۶۴,۳۳۲	۲۸۷۴
۱۴	۲۰	۱۰	۴	۵۷,۸۸۶	۵۷	۸۰	۷۶,۴۴۵	۴۱۳۰
۱۵	۲۵	۱۰	۴	۹۸,۴۴۳	۶۸	۹۳	۱۰۹,۸۸۹	۵۰۴۰
۱۶	۳۰	۱۲	۵	۱۲۷,۴۴۳	۹۸	۱۲۱	۱۳۵,۲۲۱	۵۴۵۶
۱۷	۳۵	۱۵	۵	۱۸۹,۱۱۲	۱۱۰	۱۳۷	۱۵۲,۵۴۵	۷۱۲۰
۱۸	۴۰	۱۵	۶	۲۲۲,۳۲۴	۱۳۰	۱۵۶	۱۶۲,۱۲۱	۸۵۹۰
۱۹	۴۵	۲۰	۶	۲۸۵,۱۱۲	۱۵۰	۱۸۰	۱۷۴,۲۳۲	۹۱۴۰
۲۰	۵۰	۲۰	۶	۳۲۰,۱۳۲	۱۷۲	۱۹۸	۱۸۰,۱۱۲	۱۰۱۲۰

و توانایی‌های قابل توجه الگوریتم بهینه‌سازی ذرات انبوه در یافتن پاسخ بهینه می‌باشد. همچنین، گسترش تعداد جمعیت الگوریتم داخلی، امکان دستیابی به جواب‌های بهینه را افزایش خواهد داد. نکته قابل ذکر این است که الگوریتم پیشنهادی از لحاظ تولید جواب باکیفیت با توجه به توابع هدف در مقایسه با هر یک از الگوریتم‌های ژنتیک و مرتب‌سازی ذرات در حالت استاندارد عملکردی به مراتب بهتر خواهد داشت. در واقع این الگوریتم بهینه‌سازی از توانایی الگوریتم ژنتیک مرتب‌سازی نامغلوب و الگوریتم بهینه‌سازی ذرات انبوه استفاده می‌نماید. الگوریتم ژنتیک مرتب‌سازی نامغلوب در بهینه‌سازی مسائل چندهدفه با تعداد متغیرهای زیاد و گسسته با استفاده از قوانین انتقالی احتمالی به جای قوانین انتقالی قطعی از قابلیت ویژه‌ای برخوردار است، (بدین معنا که حرکت آن در هر



شکل ۲: تغییرات زمان محاسبات بر اساس تغییر اندازه مسئله مورد مطالعه

جواب بهینه ممکن افزایش می‌یابد (یعنی هر چه تعداد تکرار و جمعیت الگوریتم درونی کمتر و تعداد تکرار و جمعیت الگوریتم بیرونی بیشتر باشد سرعت اجرای الگوریتم نیز بیشتر خواهد بود) که این امر در نتیجه سرعت مناسب

جدول ۱۶: مقایسه مقدار رتبه‌بندی الگوریتم بهینه‌ساز ترکیبی پیشنهادی NSGAI-PSO در برابر سایر الگوریتم‌های مقایسه‌ای در سناریوهای مختلف

شماره سناریو	الگوریتم PSO	الگوریتم NSGAI	الگوریتم NSGAI-PSO
۱	۷۷,۴۳	۷۸,۱۲	۷۶,۲۶
۲	۷۸,۸۷	۷۹,۳۳	۷۷,۵۳
۳	۸۱,۱۷	۸۲,۰۹	۷۹,۷۶
۴	۸۹,۲۵	۸۹,۶۰	۸۸,۳۰
۵	۹۲,۶۰	۹۳,۵۴	۹۰,۷۲
۶	۱۰۱,۱۱	۱۰۳,۸۳	۹۹,۲۳
۷	۱۴۶,۵۰	۱۴۸,۶۶	۱۴۲,۱۶
۸	۱۶۴,۲۴	۱۶۶,۳۹	۱۵۹,۱۲
۹	۲۰۸,۶۶	۲۱۰,۷۶	۲۰۴,۱۲
۱۰	۲۶۴,۹۰	۲۷۹,۸۸	۲۶۲,۰۷
۱۱	۲۹۸,۶۵	۳۰۰,۹۰	۲۹۵,۴۴
۱۲	۳۲۵,۸۹	۳۳۰,۵۰	۳۲۱,۸۳
۱۳	۵۳۸,۶۸	۵۴۰,۷۰	۵۳۲,۲۹
۱۴	۷۸۵,۹۱	۷۹۰,۴۴	۷۷۰,۱۶
۱۵	۹۵۴,۲۱	۹۶۶,۶۶	۹۴۱,۶۹
۱۶	۱۰۴۲,۱۱	۱۰۶۰,۶۳	۱۰۲۳,۴۰
۱۷	۱۴۰۰,۰۴	۱۴۰۴,۹۹	۱۳۳۳,۹۰
۱۸	۱۶۲۰,۸۸	۱۶۵۱,۰۹	۱۵۹۸,۱۰
۱۹	۱۷۶۰,۶۳	۱۷۸۸,۹۰	۱۷۱۲,۰۰
۲۰	۱۹۵۰,۲۳	۱۹۹۰,۵۵	۱۸۹۳,۰۰

### ۵. نتیجه‌گیری

در این مقاله، مسئله تخصیص منابع و زمان‌بندی کارها روی ماشین‌های مجازی در مراکز داده‌ای ابر با نگاه زنجیره تأمین در محیط رایانش ابری با توجه به مفاهیم فناوری گروهی مطرح شد. این مسئله به یک مسئله بهینه‌سازی چند هدفه با رویکرد کمینه‌سازی فرمول‌بندی شد. اهداف چندگانه مسئله به صورت توابع هدف در نظر گرفته شد. هدف اصلی مسئله، زمان‌بندی کل وظایف می‌باشد که پیش از این نیز توسط بسیاری از افراد مورد بررسی قرار گرفته شده بود. اهداف مورد نظر این مقاله شامل به حداقل رساندن اختلاف بار سرویس‌دهنده‌ها، تعداد انتقال بین سرویس‌دهنده‌ای، تعداد ماشین‌های مجازی فعال، هزینه انجام کارها و مصرف انرژی سرویس‌دهنده‌ها از جمله سایر مواردی دیگری می‌باشد که در تحقیق حال حاضر مورد بررسی قرار گرفتند. مسئله مورد بررسی به جهت پیچیدگی از نوع NP-Hard می‌باشد که حل آن در ابعاد بزرگ‌تر به علت وجود متغیرها و محدودیت‌های فراوان نیازمند صرف زمان بسیار زیادی می‌باشد. به همین منظور به جهت حل مسئله در ابعاد بزرگ‌تر از روش بهینه‌سازی ترکیبی الگوریتم ژنتیک مرتب‌سازی نامغلوب و بهینه‌سازی ذرات انبوه (NSGAI-PSO) استفاده گردید که این الگوریتم به جهت دستیابی به جواب‌های با کیفیت بالاتر و دستیابی به جواب‌های قطعی‌تر مورد استفاده واقع گردید. در این الگوریتم به ازای هر یک از

نقطه از الگوریتم کاملاً احتمالی بوده و براساس قطعیت صورت نمی‌پذیرد، این امر از مزایای مهم این روش بوده و از افتادن سیستم در کمینه محلی جلوگیری می‌نماید). هم‌چنین این الگوریتم، از سرعت همگرایی بالا، انعطاف پذیری بهتر در برابر مشکل بهینه محلی، و همکاری و اشتراک‌گذاری اطلاعات بین ذرات در الگوریتم بهینه‌سازی ذرات برای یافتن راه‌حل‌های تصمیم موجه در مسائل چند هدفه استفاده می‌نماید. با بررسی دقیق زمان اجرای الگوریتم‌های مقایسه‌ای می‌توان نتیجه گرفت الگوریتم MOPSO سریع‌ترین و الگوریتم NSGAI کندترین است و جایگاه الگوریتم پیشنهادی NSGAI-PSO از لحاظ سرعت اجرا در رتبه دوم قرار دارد ولی از لحاظ کیفیت راه‌حل‌ها، با توجه به تمام اهداف الگوریتم پیشنهادی NSGAI-PSO در جایگاه اول، الگوریتم MOPSO در جایگاه دوم و الگوریتم



objective communication-aware optimization for virtual machine placement in cloud datacenters. *Sustain Comput Inform Syst.* <https://doi.org/10.1016/j.suscom.2020.100374>.

[6] Ramzanpoor Y, Hosseini Shirvani M S, Golsorkhtabar-miri M (2022). Multi-objective fault-tolerant optimization algorithm for deployment of IoT applications on fog computing infrastructure. *Complex & intelligent Systems*, vol. 8, pp. 361-392, 2022. <https://doi.org/10.1007/s40747-021-00368-z>.

[7] Saeedi P, Hosseini Shirvani MS (2021). An improved thermodynamic simulated annealing-based approach for resource-skewness-aware and power-efficient virtual machine consolidation in cloud datacenters. *Soft Comput* 25:5233–5260. <https://doi.org/10.1007/s00500-020-05523-1>.

[۸] کردگاری، عادل، عشقی، کوروش، اکبری پور، حسین. (۱۳۹۷). «ترکیب سرویس‌ها در ساخت و تولید ابری: مدل‌سازی ریاضی و توسعه الگوریتم فراابتکاری مبتنی بر آنالیز چشم انداز، نشریه پژوهش‌های مهندسی صنایع در سیستم‌های تولید

[9] Foo, Y. W., Goh, C., Lim, H. C., Zhan, Z. H., & Li, Y. (2015). Evolutionary neural network-based energy consumption forecast for cloud computing. In 2015 International Conference on Cloud Computing Research and Innovation (IC-CRI) (pp. 53-64). IEEE.

[10] Wang, S.I., Guo, L., Kang, L. et al. (2014). Research on selection strategy of machining equipment in cloud manufacturing. *Int J Adv Manuf Technol* 71, 1549–1563 (2014). <https://doi.org/10.1007/s00170-013-5578-5>.

[11] Lei Ren, Lin Zhang, Lihui Wang, Fei Tao, Xudong Chai (2017). Cloud manufacturing: key characteristics and applications. *International journal of computer integrated manufacturing*, 30 (6), pp. 501-515. <https://doi.org/10.1080/0951192X.2014.902105>.

[12] Riahi, M.; Krichen, S. (2018). A multi-objective decision support framework for virtual machine placement in cloud data centers: A real case study. *J. Supercomput.* 74, 2984–3015.

[13] Guerrero, C.; Lera, I.; Bermejo, B.; Juiz, C. (2018). Multi-objective Optimization for Virtual Machine Allocation and Replica Placement in Virtualized Hadoop. *IEEE Trans. Parallel Distrib. Syst.* 29, 2568–2581.

[14] Tzu-Chi Huang, Kuo-Chih Chu and Kaur.N. (2020). Speed-based Load Balancer for Scheduling Reduce Tasks to Process Intermediate Data of MapReduce Applications on Cloud Computing “Cloud Computing, International Journal of Engineering Science Invention, Vol.2, Issue 1.

[15] HosseiniShirvani, M. (2021) Bi-objective web service composition problem in multi-cloud environmen: a bi-objective time-varying particle swarm optimisation algorithm. *Journal of Experimental & Theoretical Artificial Intelligence*, vol. 23, no. 2. pp. 179-202. <https://doi.org/10.1080/0952813X.2020.1725652>.

[16] Deb K, Agrawal S, Pratap A, Meyarivan T (2000) A fast elitist non-dominated sorting genetic algorithm for multi-objective optimization: NSGA-II. *Lecture notes in computer science (including subseries lecture notes in artificial intelligence and lecture notes in bioinformatics)*, vol 1917. Springer, Berlin, pp 849–858.

محدودیت‌ها یک تابع جریمه همراه با یک فاکتور جریمه برای تمام محدودیت‌ها در نظر گرفته شد. پس از آن یک الگوریتم داخلی ژنتیک مرتب‌سازی نامغلوب، مسئله را به ازای فاکتورهای مختلف جریمه حل نمود و یک جواب بهینه محلی به دست آورد. در همان زمان، الگوریتم بیرونی بهینه‌سازی ذرات انبوه به شیوه ترکیبی و به صورت موازی از طریق انتخاب بهترین فاکتور جریمه، به جواب بهینه سراسری منتج می‌شود. نتایج حاصل از حل مسائل با اندازه‌های کوچک و بزرگ توسط روش بهینه‌سازی چندهدفه پیشنهادی برای اثبات کارایی آن در بخش شبیه‌سازی و نتایج ارائه شده است. نتایج نشان داد که روش پیشنهادی ترکیبی الگوریتم ژنتیک مرتب‌سازی نامغلوب و بهینه‌سازی تجمع ذرات کارایی قابل قبولی برای تولید جواب‌های با کیفیت، متنوع و دارای پراکندگی داشته است. همچنین براساس نتایج به دست آمده می‌توان دریافت که این الگوریتم بهینه‌سازی ترکیبی، کارایی و عملکرد بهتری نسبت به الگوریتم‌های ژنتیک مرتب‌سازی نامغلوب و ازدحام ذرات چندهدفه به تنهایی خواهد داشت. در واقع این الگوریتم بهینه‌سازی از توانایی الگوریتم ژنتیک مرتب‌سازی نامغلوب و الگوریتم بهینه‌سازی ذرات انبوه استفاده می‌نماید و در نتیجه از گیر افتادن فرآیند بهینه‌سازی در تله کمینه محلی جلوگیری می‌نماید.

## مراجع

[1] Wei H., Jia G., Zong H., Kong J. (2019), Multi-Objective Service Selection and Scheduling with Linguistic Preference in Cloud Manufacturing, *Sustainability* 11, no. 9: 2619. <https://doi.org/10.3390/su11092619>.

[2] Kliazovich D., Bouvry P., Khan S. U. (2010). DENS: Data Center Energy-Efficient Network-Aware Scheduling, *IEEE/ACM Int'l Conference on Green Computing and Communications & Int'l Conference on Cyber, Physical and Social Computing*, 2010, pp. 69-75, doi: 10.1109/GreenCom-CP-SCom.2010.31.

[3] Khan, S.U., Zomaya, A.Y. (2015). *Handbook on Datacenters*. Springer, New York, NY.

[۴] حسینی شیروانی، میرسعید. (۱۴۰۰). "حل مسئله ی بهینه‌سازی چند هدفه ی جایگذاری ماشین‌های مجازی در مراکز داده‌ای ابر با رویکرد کمینه سازی مصرف انرژی و هدررفت منابع با الگوریتم تبرید فلزات". نشریه مهندسی برق و کامپیوتر ایران. ۱۹(۳)، ۱۰۶-۱۱۶.

[5] Farzai S, Hosseini Shirvani M, Rabbani M (2020) Multi-