

ارائه مدلی جهت طراحی شبکه زنجیره تأمین حلقه بسته ابری

کیمیا خواجه^۱، عماد روغنیان^{۲*}

۱. دانشجوی کارشناسی ارشد لجستیک و زنجیره تأمین، گروه مهندسی صنایع، دانشکده مهندسی صنایع، دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی، تهران، ایران
۲. دانشیار گروه مهندسی صنایع، دانشکده مهندسی صنایع، دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی، تهران، ایران

خلاصه

رقابت شدید در بازار امروزی و تغییرات سریع محیط کسب و کار، سازمان‌ها را به پذیرش فناوری‌های نوین ترغیب کرده است. رایانش ابری به عنوان رویکردی مبتنی بر اینترنت در سال‌های اخیر توجه فراوانی یافته است. در این پژوهش، مدل زنجیره تأمین حلقه بسته ابری به عنوان راهکاری نوین برای بهینه‌سازی عملکرد زنجیره تأمین در مقایسه با مدل سنتی مورد بررسی قرار خواهد گرفت. در مدل ابری، ارسال کالا به صورت مستقیم از تولیدکننده به مشتری انجام می‌شود و مراکز واسطه حذف می‌گردند؛ منابع محاسباتی نیز به صورت اشتراکی و با پرداخت مبتنی بر مصرف مدیریت می‌شوند. علاوه بر این، سه لایه خدمات IaaS، PaaS، SaaS و سه نوع ابر خصوصی، عمومی، ترکیبی همزمان لحاظ شده‌اند، که می‌تواند به عنوان نوآوری دیگری در این تحقیق تلقی گردد. برای مدل‌سازی، پیاده‌سازی و حل، از نرم‌افزار GAMS استفاده می‌شود. همچنین، به منظور ارزیابی عملکرد مدل در شرایط مختلف، تحلیل حساسیت نسبت به افزایش تعداد نوع خدمات، سرویس‌دهنده‌ها و مشتری مورد بررسی قرار خواهد گرفت و نتایج آن در دو حالت سنتی و ابری مقایسه می‌شود. در مجموع، یافته‌های این پژوهش بیانگر آن است که استفاده از فناوری رایانش ابری، به واسطه ویژگی‌هایی نظیر قابلیت مقیاس‌پذیری و پرداخت براساس میزان مصرف، می‌تواند راهکاری مؤثر و مقرون به صرفه برای مدیریت زنجیره تأمین در شرایط تقاضای بالا ارائه دهد. بدین ترتیب، مدل زنجیره تأمین ابری نه تنها عملکرد بهتری در پاسخ‌گویی به نیازهای مشتریان دارد، بلکه از منظر هزینه نیز نسبت به مدل سنتی برتری قابل توجهی نشان می‌دهد.

اطلاعات مقاله

تاریخچه مقاله:

دریافت: ۱۴۰۴/۰۳/۱۹

بازنگری: ۱۴۰۴/۰۶/۱۱

پذیرش: ۱۴۰۴/۰۶/۱۹

(مقاله پژوهشی)

کلمات کلیدی:

زنجیره تأمین ابری

زنجیره تأمین حلقه بسته

بهینه‌سازی

رایانش ابری

۱. مقدمه و پیشینه تحقیق

مسائل طراحی شبکه لجستیک و زنجیره تأمین دهه‌ها است که به طور گسترده مورد بررسی قرار گرفته است. امروزه با توجه به رقابتی شدن بازار و همچنین توجه زیاد مشتریان به عواملی نظیر قیمت، کیفیت، مدت زمان تحویل محصول و تنوع زیاد محصولات سبب شده تا مدیریت زنجیره تأمین در سازمان‌های تولیدی اهمیت زیادی پیدا کند [۱]. همچنین به دلایل زیست‌محیطی، اقتصادی و یا حتی قانونی، شرکت‌ها مجبور به پاسخ‌گویی پس از فروش به مشتریان نسبت به

محصولاتشان شدند؛ به همین علت طراحی شبکه لجستیک معکوس توجه روزافزونی را به خود جلب کرده است. از این رو زنجیره تأمین حلقه بسته با تمرکز بر چرخه عمر کامل محصول که به طور همزمان شامل لجستیک پیشرو و لجستیک معکوس می‌شود، باعث بازیابی ارزش، از محصولاتی که عمر استفاده از آن‌ها پایان یافته یا اینکه به صورت بلااستفاده باقی مانده‌اند، می‌شود. از طرفی دیگر زنجیره‌های تأمین حلقه بسته به عنوان ابزارهای مهم در کاهش مصرف مواد خام و ایجاد آلودگی‌های زیست‌محیطی، در پاسخ به مشکلاتی از جمله زیاد شدن

* نویسنده مسئول: عماد روغنیان

تلفن: ۰۲۱-۸۴۰۶۳۳۴۸؛ پست الکترونیکی: e_roghanian@kntu.ac.ir

چرخه کامل تحلیل داده‌های زنجیره تأمین را پوشش داده و نقش این فناوری‌ها را در بهبود تصمیم‌گیری هوشمند، افزایش انعطاف‌پذیری و ارتقای پایداری زنجیره تأمین نشان داده‌اند. تان و همکاران [۹] با رویکرد داده‌محور و به‌کارگیری یادگیری ماشین برای پیش‌بینی تقاضا و تخصیص موجودی در زنجیره تأمین ابری نشان می‌دهند که روش‌های داده‌محور در شرایط عدم قطعیت تقاضا نسبت به روش‌های سنتی عملکرد بهتری داشته و دقت تخصیص موجودی را افزایش می‌دهند.

خدمات ابری بهبودهای جدید در کسب‌وکارها مانند ابزارهایی برای هماهنگی و همکاری بهتر و به اشتراک‌گذاری اطلاعات و دانش ایجاد می‌کنند [۱۰]. گملگارد و نوییکا [۱۱] با مرور مفهومی ادبیات، نقش رایانش ابری را در تحول مدیریت زنجیره تأمین بررسی کرده‌اند و نشان داده‌اند که رایانش ابری با ایجاد انعطاف‌پذیری ساختاری و همکاری هم‌زمان شرکای زنجیره، زمینه‌ساز گذار از مدل خطی سنتی به مدل پلتفرمی در زنجیره تأمین می‌شود. جیانگ و همکاران [۱۲] با استفاده از مدل بازی استکلبرگ و تئوری بهینه‌سازی، استراتژی‌های قیمت‌گذاری در زنجیره تأمین حلقه بسته ابری را بررسی کرده‌اند. نتایج آن‌ها نشان می‌دهد که محاسبات ابری می‌تواند با بهینه‌سازی قیمت‌گذاری، سودآوری زنجیره تأمین را افزایش دهد. لیو و همکاران [۱۳] در مطالعه خود با استفاده از نظریه بازی‌ها، یک زنجیره تأمین شامل ارائه‌دهنده خدمات ابری و یک تولیدکننده را بررسی کرده و نشان دادند که نگرانی‌های مربوط به امنیت داده‌ها مانع از همکاری مؤثر بین دوطرف می‌شود. با این حال، استفاده از قراردادهای تقسیم درآمد می‌تواند منجر به هماهنگی بهتر زنجیره، بهبود عملکرد زیست‌محیطی و افزایش منافع مشترک شود.

با توجه به ماهیت تولید ابری که شامل تعداد زیادی ارائه‌دهنده خدمات و تقاضاکنندگان خدماتی است که به ابر تولید معرفی می‌شوند، مسأله ترکیب خدمات معرفی می‌شود. آقامحمدزاده و فتحی‌ولی‌لایی [۱۴] مکانیسم متمرکز مسأله ترکیب خدمات را به چالش می‌کشند و یک پلتفرم نوآورانه با عنوان مدل ترکیب خدمات مبتنی بر بلاک‌چین براساس فناوری بلاکچین معرفی می‌کنند. مدل‌های کسب‌وکار مبتنی بر ابر می‌توانند ساختارهای انعطاف‌پذیری را به‌عنوان یک فرصت غیرقابل اجتناب برای شبکه‌های تأمین و تولید ایجاد کنند. این امکان با استفاده از قابلیت‌های ترکیب خدمات در شبکه تولید ابری به‌دست می‌آید که عملکرد شبکه تأمین را هنگام برخورد با اختلالات به‌شدت بهبود می‌بخشد. شهاب و همکاران [۱۵] در مطالعه خود، با تمرکز بر روی تکرار به‌عنوان یکی از رویکردهای مؤثر در حوزه انعطاف‌پذیری، یک مدل جدید برای ترکیب خدمات تولید معرفی کردند. در سال‌های اخیر، دو عامل کلیدی به‌نام جهانی‌سازی اقتصادی و جهانی‌سازی منابع تولید، کسب‌وکارها را وادار به تغییر فرآیندهای خود کرده‌اند تا در محیط‌های رقابتی بقای خود را تضمین کنند. آقامحمدزاده و همکاران [۱۶] برای دستیابی به هدف ایده‌آل تولید ابری، بر روی مفهوم برنامه‌ریزی لجستیک شبکه تأمین‌کنندگان و ترکیب خدمات تولید متمرکز شدند. هدف از مفهوم تولید ابری ایجاد یک پلتفرم تولید ابری

ضایعات و کمبود منابع ظاهر شدند [۲]؛ همچنین می‌توانند از لحاظ زیست‌محیطی در زمان انهدام مناسب محصولات مفید باشند.

پارادایم صنعت ۴.۰ ساختارهای زنجیره تأمین را با تغییراتی برای مدل‌های کسب‌وکار مبتنی بر ابر فراهم کرد. زنجیره تأمین ابری یک روش برای مدیریت و توزیع محصولات و خدمات به‌وسیله ابر است. این نوع زنجیره تأمین به کمک فناوری‌های ابری مانند محاسبات ابری، ذخیره‌سازی ابری و ابزارهای مدیریت مجازی، فرآیندهای مرتبط با مدیریت زنجیره تأمین را بهبود می‌بخشد.

زنجیره تأمین حلقه بسته ابری یک مفهوم نوآورانه است که از ادغام فناوری ابری با زنجیره تأمین معمولی به وجود آمده است. استفاده از فناوری ابری می‌تواند به کاهش هزینه‌ها و بهبود کارایی در زنجیره تأمین، بهبود مدیریت منابع و کاهش آثار منفی بر محیط زیست، توسعه روش‌ها و مدل‌های جدیدی برای بهبود عملکرد زنجیره تأمین و شناخت بهتر فرصت‌ها و چالش‌های این فرآیند کمک کنند.

کوتاه‌تر شدن دوره عمر محصولات، تغییرات مداوم و توسعه فرآیندهای تجاری منجر به تغییر در مدل‌های کسب‌وکار و زندگی کاری روزمره شده است. مشتریان انتظار دارند تراکنش‌های تجاری سریع‌تر، راه‌حل‌های یکپارچه و شفافیت در زنجیره ارزش را تجربه کنند. تبدیل فرآیندهای سنتی زنجیره ارزش به سمت مدیریت دیجیتال زنجیره ارزش، به شرکت‌ها امکان می‌دهد که جایگاه خود را در بازار رقابتی حفظ کنند. دهمر و نیمن [۳] در مقاله خود مراحل این تبدیل را از طریق مثال عملی در مدیریت پسماندهای الکترونیکی نشان داده‌اند. تأمین ابری این امکان را فراهم می‌کند که از برخی از دارایی‌های فیزیکی یا دیجیتال شخص ثالث برای طراحی و مدیریت یک شبکه تأمین استفاده شود. این مدل کسب‌وکار در عمل بسیار محبوب شده است و نیاز به توسعه تحقیقات دقیق دارد. ایوانو و همکاران [۴] مدل تأمین ابری را معرفی کردند که یک مدل کسب‌وکار بر پایه اتصال شبکه‌های فیزیکی و دیجیتال تعدادی از دارایی‌های فیزیکی و دیجیتال شخص ثالث به منظور طراحی و مدیریت شبکه تأمین ایجاد می‌کند. امینی و جهانبخش جاوید [۵] در مطالعه خود به بررسی، توسعه و اعتبارسنجی یک مدل تحقیقی برای بررسی تأثیر هشت عامل زمینه‌ای بر انتخاب محاسبات ابری در صنایع کوچک پرداختند. ایچ و همکاران [۶] اثر ادغام هوش مصنوعی و رایانش ابری بر خودکارسازی زنجیره تأمین بررسی کردند و بهبودهایی همچون کاهش هزینه‌ها و افزایش دقت گزارش کردند. کوماری و سینق [۷] با تمرکز بر چالش‌های زیست‌محیطی ناشی از شبکه‌های سنتی اینترنت اشیاء، راهکارهای ترکیبی رایانش ابری سبز و طراحی پایدار بررسی کردند. آن‌ها نشان داده‌اند که ادغام این رویکردها می‌تواند به کاهش مصرف انرژی، کاهش پسماند الکترونیکی و ارتقای پایداری در چرخه عمر تجهیزات IoT منجر شود. استفانویچ و همکاران [۸] به بررسی روش‌ها و مدل‌های تحلیلی مبتنی بر داده‌های کلان در مدیریت زنجیره تأمین پایدار پرداختند. آن‌ها با ارائه یک مدل چندلایه مبتنی بر رایانش ابری،

است که منابع تولید توزیع شده را جمع می‌کند، سپس آن‌ها را به خدمات تولید تبدیل می‌کند و به صورت متمرکز مدیریت می‌کند. یکی از جنبه‌های بسیار مهم این مدیریت متمرکز، برنامه‌ریزی وظایف است. دلارام و فتاحی ولی لای [۱۷] در مقاله خود یک مدل پایه برای مسأله برنامه‌ریزی وظایف در سیستم‌های تولید ابری ارائه می‌دهند؛ و با استفاده از یک مثال توضیحی، اعتبارسنجی و صحت‌سنجی مدل پیشنهادی بررسی می‌شود. اکبرپور و همکاران [۱۸] با بررسی تولید ابری، مدل‌های بهینه‌سازی انتخاب خدمات و زمان‌بندی را ارائه دادند. نتایج آن‌ها نشان داد که استفاده از شبکه حمل‌ونقل هیبریدی هاب و اسپوک می‌تواند هزینه و زمان را بهینه کرده و راه‌حل‌های عملی‌تری برای تولید ابری فراهم کند. حسینی شیروانی [۱۹] یک الگوریتم بهینه‌سازی ژنتیک دوهدفه برای ترکیب خدمات وب در محیط چندابری ارائه داده است. نتایج نشان می‌دهد که این الگوریتم با در نظر گرفتن هزینه و ریسک امنیتی، ترکیب بهینه‌تری نسبت به روش‌های سنتی ارائه می‌دهد. فرضایی و همکاران [۲۰] با بررسی مسأله بهینه‌سازی چند هدفه قراردادان ماشین مجازی در مراکز داده ابری، بهینه‌سازی مصرف شکل پهنای باند شبکه را پیشنهاد داده‌اند. نتایج نشان می‌دهد که الگوریتم تکاملی ارائه‌شده عملکرد بهتری نسبت به روش‌های موجود در کاهش مصرف انرژی و بهینه‌سازی منابع دارد. سعیدی و حسینی شیروانی [۲۱] با بررسی ادغام ماشین‌های مجازی در محاسبات ابری، مدل دوسطحی برنامه‌ریزی خطی عدد صحیح برای کاهش مصرف انرژی مراکز داده ارائه دادند. نتایج نشان می‌دهد که الگوریتم شبیه‌سازی تیریدی بهبودیافته در کاهش تعداد سرورهای فعال و بهینه‌سازی مصرف انرژی عملکرد بهتری دارد. حاجی‌پور و رهبرجو [۲۲] با بهره‌گیری از فناوری‌های ابری و تحلیل داده‌های کلان، به بهینه‌سازی فرآیندهای زنجیره‌تأمین در سازمان‌ها پرداختند و نشان دادند که استفاده از این فناوری‌ها می‌تواند تصمیم‌گیری مدیریتی، بهره‌وری سازمان و رضایت مشتری را بهبود بخشد. ایوانوو و همکاران [۲۳] زنجیره‌تأمین ابری را به عنوان یک مدل کسب‌وکار جدید مبتنی بر شبکه‌سازی ابری معرفی کردند. آن‌ها با تحلیل موارد عملی، ویژگی‌های کلیدی این مدل مانند پویایی چندساختاری، ترکیب خدمات پویا، انعطاف‌پذیری و پایداری را شناسایی کردند. وانگ و همکاران [۲۴] با طراحی سیستم مدیریت زنجیره‌تأمین در لجستیک هوشمند مبتنی بر رایانش ابری و اینترنت اشیا، و با بهره‌گیری از شبکه‌های عصبی عمیق، الگوریتمی بهبودیافته برای تشخیص تصویر ارائه کردند که موجب افزایش حدود ۲۰ درصدی کارایی و کاهش نرخ خطا شده است. هول [۲۵] با تمرکز بر تلفیق رایانش ابری و انبار داده، نشان داده است که بهره‌گیری از این فناوری‌ها موجب بهبود تحلیل‌های زنجیره‌تأمین و خرده‌فروشی، افزایش چابکی عملیاتی و تصمیم‌گیری داده‌محور شده و به کاهش هزینه‌ها و بهبود نرخ تحویل به موقع منجر می‌شود. تقی‌پور و محبوبی [۲۶] در مطالعه خود بررسی کردند که چگونه محاسبات ابری به عنوان جایگزینی کارآمد برای سیستم‌های پرهزینه برنامه‌ریزی منابع سازمانی در کسب‌وکارهای کوچک و متوسط عمل می‌کند. نتایج

این مقاله نشان می‌دهد که محاسبات ابری عملکرد و کارایی کسب‌وکارها را بهبود می‌بخشد، در حالی که چالش‌هایی نظیر امنیت و قابلیت اعتماد خدمات نیز در این زمینه مطرح می‌باشد. اگرچه و همکاران [۲۷] در پژوهشی با بررسی و تحلیل تئوری‌های موجود، تحلیل کیفی و کمی مطالعات پیشین و معرفی مقالات مرتبط، اهمیت دیجیتالی کردن زنجیره‌تأمین را مورد تأکید قرار دادند. آن‌ها نشان می‌دهند که تکنولوژی‌های نوین مانند کلان‌داده، رایانش ابری و اینترنت اشیا تأثیرات قابل‌توجهی بر مدیریت زنجیره‌تأمین دارند و به بهبود عملکرد و کارایی این زنجیره‌ها کمک می‌کنند. لو و همکاران [۲۸] در مطالعه‌ای به بررسی تصمیم‌گیری در زنجیره‌تأمین خدمات ابری پرداخته و استفاده از مدل بازی و قرارداد شاپلی برای تحلیل و بهبود همکاری در زنجیره‌تأمین را معرفی می‌کند. جیانگ [۲۹] سیستم‌های سنتی زنجیره‌تأمین را با سیستم‌های کنترل هوشمند مبتنی بر فناوری رایانش ابری و واقعیت مجازی مقایسه کرد. نتایج نشان می‌دهد که دقت تحلیل تقاضای مشتری در سیستم‌های سنتی و هوشمند به ترتیب ۸۳.۶۸٪ و ۹۴.۴۰٪ بوده است. سیستم‌های هوشمند با بهبود دقت تحلیل تقاضا، کاهش فشار موجودی، بهینه‌سازی فروش و مدیریت کامل چرخه عمر محصول، چابکی و کارایی زنجیره‌تأمین را افزایش می‌دهند. نهاس و همکاران [۳۰] تأثیر استفاده از داده‌های خارجی و فناوری‌های ابری را برای مدیریت تطبیقی زنجیره‌تأمین در صنعت خرده‌فروشی بررسی کردند. نتایج نشان می‌دهد که استفاده از معماری هیبریدی شامل فناوری‌های ابری گوگل، شبیه‌سازی و بهینه‌سازی، می‌تواند زمان محاسباتی را کاهش و کیفیت حل مسائل زنجیره‌تأمین را بهبود بخشد.

مرور ادبیات موضوع و تحلیل شکاف‌های موجود در پژوهش‌های پیشین نشان می‌دهد که بیشتر مطالعات در حوزه زنجیره‌تأمین ابری بر مدل‌های توصیفی و آماری متمرکز بوده‌اند و عمدتاً از رایانش ابری تنها در قالب مدل «ترم‌افزار به عنوان خدمت» (SaaS) بهره گرفته‌اند. تاکنون مدل ریاضی جامعی که کلیه اجزای زنجیره‌تأمین را در چارچوب رایانش ابری، با در نظر گرفتن انواع مدل‌های ابر از جمله ابر عمومی، خصوصی و ترکیبی، به صورت یکپارچه پوشش دهد، ارائه نشده است. علاوه بر این، اغلب پژوهش‌های موجود، تأثیر فناوری ابری را تنها بر بخش‌های محدودی از زنجیره‌تأمین بررسی کرده‌اند و یکپارچه‌سازی کامل این فناوری در تمامی مراحل زنجیره، از تأمین مواد اولیه تا بازیافت و بازتولید، مورد توجه قرار نگرفته است.

دراستای رفع این خلأ پژوهشی، مطالعه حاضر به طراحی و توسعه یک مدل ریاضی یکپارچه برای زنجیره‌تأمین حلقه بسته ابری پرداخته و آن را با ساختار سنتی زنجیره‌تأمین مقایسه می‌کند. در این مدل، رایانش ابری نه تنها به عنوان ابزاری برای کاهش هزینه‌ها و بهینه‌سازی منابع ایفای نقش می‌کند، بلکه با ارتقاء مدیریت داده‌ها، حذف زیرساخت‌های فیزیکی غیرضروری و تسهیل هماهنگی میان اجزای زنجیره، موجب بهبود عملکرد زیست‌محیطی نیز می‌شود.

ساختار مقاله به این ترتیب سازمان‌دهی شده است: در بخش

- مراکز احیاء: محصول تعمیر شده یا نوسازی شده مجدداً به زنجیره اصلی بازگشته و به مراکز توزیع ارسال می شود یا در صورت عدم امکان احیاء، به مراکز انهدام فرستاده می شود.
 - مراکز بازیافت: مواد بازیافتی به ابتدای زنجیره (تأمین کنندگان) بازگشته یا در غیر این صورت، به مراکز انهدام منتقل می شوند.
- در مدل پیشرفته، با پیاده سازی فناوری ابری، برخی از مراکز بالقوه (مانند توزیع، خرده فروشی و جمع آوری) حذف می شوند. داده های مرتبط با این مراکز از طریق زیرساخت های ابری ذخیره و پردازش می شوند.

۱-۲. شرح مسئله و مدل سازی

ابتدا فرضیات، اندیس ها، پارامترها و متغیرهای مسئله بیان و سپس مدل مربوطه ارائه می گردد. از آنجا که مسئله محیط زیست امروزه توجهات زیادی را به خود جلب کرده است، از این رو مدل پیشنهادی علاوه بر مسائل هزینه ای، به مسئله سبز بودن زنجیره تأمین یعنی انتشار کربن در محیط را مدنظر قرار می دهد.

۱-۲. شبکه زنجیره تأمین حلقه بسته بدون فناوری ابری

مفروضات

- مشخصات و مفروضات مسئله به شرح زیر می باشد:
- تقاضای مشتریان ثابت و معین است.
 - تمامی تقاضاها باید به طور کامل تأمین شوند.
 - ظرفیت مراکز ثابت و معلوم است.
 - هزینه های حمل و نقل موجود در شبکه معلوم است.

بعدی، بیان مسئله و دومدل ریاضی معرفی می شود. در ادامه، حل مدل ها و مقایسه نتایج به ازای مسائل با اندازه های مختلف ارائه شده و در پایان، نتیجه گیری کلی و پیشنهادهایی برای پژوهش های آتی بیان می گردد.

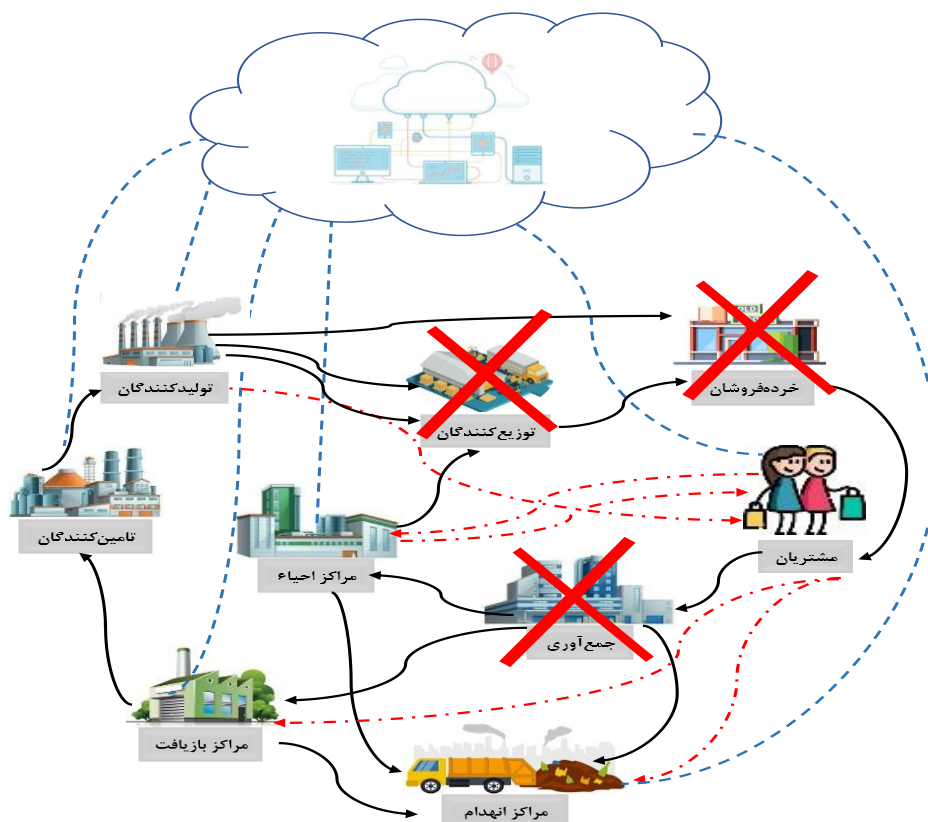
۲. بیان مسئله

شبکه های زنجیره تأمین حلقه بسته به دلیل قابلیت بازیافت و استفاده مجدد از محصولات و مواد، به عنوان یکی از راهکارهای مهم در کاهش اثرات زیست محیطی شناخته می شوند. در سال های اخیر، با افزایش نگرانی ها درباره تغییرات اقلیمی و فشارهای قانونی و اجتماعی برای کاهش انتشار کربن، طراحی و پیاده سازی این نوع شبکه ها بیش از پیش مورد توجه قرار گرفته است. در این تحقیق، دو مدل ریاضی برای یک شبکه زنجیره تأمین حلقه بسته ارائه شده است:

(۱) مدل اولیه بدون فناوری ابری

(۲) مدل پیشرفته با بهره گیری از فناوری رایانش ابری

زنجیره تأمین حلقه بسته اولیه شامل دو بخش اصلی، یعنی جریان رفت و جریان برگشت است. مراکز موجود در جهت رفت شامل تأمین کننده، تولید کننده، توزیع کننده، خرده فروشی و مشتری می شود؛ و همچنین در جهت برگشت شامل مراکز جمع آوری و مرتب سازی، احیاء، انهدام و بازیافت است. مراکز جمع آوری، توزیع و خرده فروشی بالقوه هستند و احداث آن ها هزینه هایی را دربر می گیرد. در جریان برگشت، محصول پس از جمع آوری، براساس وضعیت و شرایط کیفی به یکی از مراکز احیاء، انهدام یا بازیافت ارسال می شود:



شکل (۱). نمایی از شبکه زنجیره تأمین مورد بررسی

$d2_{ca}$	تقاضای مشتری c از محصول a
re_{ca}	نرخ بازگشتی از مراکز مشتری c از محصول a
sm	متوسط کسر محصولات انهدامی
si	متوسط کسر محصولات احیا
ft_t	هزینه ثابت احداث مراکز توزیع
fg_g	هزینه ثابت احداث مراکز خرده‌فروشی
fj_j	هزینه ثابت احداث مراکز جمع‌آوری
fp_{ap}	هزینه تولید یک واحد محصول a توسط مرکز تولید p
e_{spvtm}	هزینه حمل یک واحد ماده خام v از مرکز تأمین s به مرکز تولید p توسط وسیله حمل tm
h_{ptatm}	هزینه حمل یک واحد محصول a از مرکز تولید p به مرکز توزیع t توسط وسیله حمل tm
h_{pgatm}	هزینه حمل یک واحد محصول a از مرکز تولید p به مرکز خرده‌فروشی g توسط وسیله حمل tm
$k_{tгатm}$	هزینه حمل یک واحد محصول a از مرکز توزیع t به مرکز خرده‌فروشی g توسط وسیله حمل tm
l_{gcatm}	هزینه حمل یک واحد محصول a از مرکز خرده‌فروشی g به مشتری c توسط وسیله حمل tm
n_{cjatm}	هزینه حمل یک واحد محصول برگشتی a از مشتری c به مرکز جمع‌آوری j توسط وسیله حمل tm
$o1_{jiatm}$	هزینه حمل یک واحد محصول برگشتی a از مرکز جمع‌آوری j به مرکز احیا i توسط وسیله حمل tm
$o2_{jmatm}$	هزینه حمل یک واحد محصول برگشتی a از مرکز جمع‌آوری j به مرکز انهدام m توسط وسیله حمل tm
$o3_{jratm}$	هزینه حمل یک واحد محصول برگشتی a از مرکز جمع‌آوری j به مرکز باز یافت r توسط وسیله حمل tm
$q1_{imatm}$	هزینه حمل یک واحد محصول برگشتی a از مرکز احیا i به مرکز انهدام m توسط وسیله حمل tm
$q2_{itatm}$	هزینه حمل یک واحد محصول برگشتی a از مرکز احیا i به مرکز توزیع t توسط وسیله حمل tm
$u1_{rmatm}$	هزینه حمل یک واحد محصول برگشتی a از مرکز باز یافت r به مرکز انهدام m توسط وسیله حمل tm
$u2_{rsatm}$	هزینه حمل یک واحد محصول برگشتی a از مرکز باز یافت r به مرکز تأمین s توسط وسیله حمل tm
cp_{pa}	ظرفیت تولید مرکز a در مرکز تولید p
cs_{sv}	ظرفیت تأمین ماده خام v توسط مرکز تأمین s
ct_{ta}	ظرفیت توزیع محصول a در مرکز توزیع t
cg_{ga}	ظرفیت فروش محصول a در مرکز خرده‌فروشی g
cj_{ja}	ظرفیت جمع‌آوری محصول a در مرکز جمع‌آوری j
ci_{ia}	ظرفیت احیا محصول a در مرکز احیا i
cm_{ma}	ظرفیت انهدام محصول a در مرکز انهدام m
cr_{ra}	ظرفیت باز یافت محصول a در مرکز باز یافت r
ϵ	ماکزیمم کربن مجازی که زنجیره می‌تواند در محیط رها کند
$co2_{ap}$	درصد انتشار کربن به‌ازای تولید یک واحد محصول a توسط تولیدکننده p
$e1_{spvtm}$	درصد انتشار کربن به‌ازای حمل یک واحد ماده خام v از مرکز

- هزینه‌های مرتبط با احداث مراکز بالقوه (توزیع، خرده‌فروشی و جمع‌آوری) معلوم است.
- مکان بالقوه برای احداث تسهیلات معلوم است و باید از بین این مکان‌های بالقوه مکان بهینه برای احداث انتخاب شود.
- تنها در صورت احداث وجود جریان از آن مرکز امکان‌پذیر است.
- مدل چند محصولی است.
- هر محصول فقط با یک ماشین و از یک مبدأ برای مشتری ارسال می‌شود.
- مسیر حرکت محصول از تولیدکننده به خرده‌فروش به دو صورت امکان‌پذیر است:
 - (۱) ارسال مستقیم از تولیدکننده به خرده‌فروش
 - (۲) ارسال از طریق مراکز توزیع به‌عنوان واسطه
- محصول پس از جمع‌آوری، مرتب‌سازی می‌شود و بنا به وضعیت آن به یکی از مراکز احیاء، انهدام و باز یافت ارسال می‌شود.
- محصول از مراکز احیا به دو طریق خارج می‌شود:
 - (۱) مشکلات آن برطرف شده و به مراکز توزیع ارسال می‌شود و به زنجیره اصلی برمی‌گردد.
 - (۲) به مراکز انهدام ارسال می‌شود.
- در مراکز باز یافت نیز اگر بتوان محصول را باز یافت کرد به ابتدای زنجیره یعنی مراکز تأمین‌کننده برمی‌گردد و یا جهت انهدام به مراکز مربوطه ارسال می‌شود.
- انتشار کربن ناشی از فعالیت‌های لجستیکی و تولیدی به‌عنوان یک معیار بهینه‌سازی در نظر گرفته می‌شود.
- میزان انتشار کربن به ازای هر واحد محصول معلوم و مشخص است.
- ماکزیمم مقدار مجاز انتشار کربن مشخص است.
- دو مدل وسیله حمل و نقل با هزینه‌های ثابت و متفاوت در نظر گرفته شده است.

جدول (۱). مجموعه‌های زنجیره تأمین حلقه بسته سنتی

V	مجموعه مواد خام
A	مجموعه محصولات
S	مجموعه نقاط ثابت مراکز تأمین‌کننده
P	مجموعه نقاط ثابت مراکز تولیدکننده
T	مجموعه نقاط کاندید مراکز توزیع‌کننده
G	مجموعه نقاط کاندید مراکز خرده‌فروشی
C	مجموعه نقاط ثابت مشتری
J	مجموعه نقاط کاندید مراکز جمع‌آوری
I	مجموعه نقاط ثابت مراکز احیاء
M	مجموعه نقاط ثابت مراکز انهدام
R	مجموعه نقاط ثابت مراکز باز یافت
Tm	مجموعه نقاط نوع حمل و نقل

جدول (۲). پارامترهای زنجیره تأمین حلقه بسته سنتی

$d1_{pv}$	تقاضای تولیدکننده p از ماده خام v
-----------	-----------------------------------

حمل tm به مرکز انهدام m ارسال می‌شود.	
مقدار محصول برگشتی a که از مرکز احیا i توسط وسیله حمل tm به مرکز توزیع t ارسال می‌شود.	$y6_{itatm}$
مقدار محصول برگشتی a که از مرکز باز یافت r توسط وسیله حمل tm به مرکز انهدام m ارسال می‌شود.	$y7_{rmatm}$
مقدار ماده خام برگشتی v که توسط وسیله حمل tm از مرکز باز یافت r به مرکز تأمین s ارسال می‌شود.	$y8_{rsvtm}$
اگر مرکز توزیع t احداث شود یک درغیر این صورت صفر	$w1_t$
اگر مرکز خرده‌فروشی g احداث شود یک درغیر این صورت صفر	$w2_g$
اگر مرکز جمع‌آوری j احداث شود یک درغیر این صورت صفر	$w3_j$

۲-۱-۱. مدل ریاضی پیشنهادی

با توجه به نشانه‌گذاری‌های معرفی شده، مدل پیشنهادی به شرح زیر می‌باشد:

$$\begin{aligned} \text{Min } F &= F_1 + F_2 + F_3 \\ F_1 &= \sum_{\forall t} ft_t \cdot w1_t + \sum_{\forall g} fg_g \cdot w2_g \\ &\quad + \sum_{\forall j} fj_j \cdot w3_j \end{aligned} \quad (1)$$

$$F_2 = \sum_{\forall a} \sum_{\forall p} fp_{ap} \cdot x_{ap} \quad (2)$$

$$\begin{aligned} &= \sum_{\forall s} \sum_{\forall p} \sum_{\forall v} \sum_{\forall tm} es_{pvtm} \cdot x1_{spvtm} \\ &+ \sum_{\forall p} \sum_{\forall t} \sum_{\forall a} \sum_{\forall tm} b_{ptatm} \cdot x2_{ptatm} \\ &+ \sum_{\forall p} \sum_{\forall g} \sum_{\forall a} \sum_{\forall tm} h_{pgatm} \cdot x3_{pgatm} \\ &+ \sum_{\forall t} \sum_{\forall g} \sum_{\forall a} \sum_{\forall tm} k_{tgam} \cdot x4_{tgam} \\ &+ \sum_{\forall g} \sum_{\forall c} \sum_{\forall a} \sum_{\forall tm} l_{gcatm} \cdot x5_{gcatm} \\ &+ \sum_{\forall c} \sum_{\forall j} \sum_{\forall a} \sum_{\forall tm} n_{cjatm} \cdot y1_{cjatm} \\ &+ \sum_{\forall j} \sum_{\forall i} \sum_{\forall a} \sum_{\forall tm} o1_{jiatm} \cdot y2_{jiatm} \\ &+ \sum_{\forall j} \sum_{\forall m} \sum_{\forall a} \sum_{\forall tm} o2_{jmatm} \cdot y3_{jmatm} \\ &+ \sum_{\forall j} \sum_{\forall r} \sum_{\forall a} \sum_{\forall tm} o3_{jratm} \cdot y4_{jratm} \\ &+ \sum_{\forall i} \sum_{\forall m} \sum_{\forall a} \sum_{\forall tm} q1_{imatm} \cdot y5_{imatm} \\ &+ \sum_{\forall i} \sum_{\forall t} \sum_{\forall a} \sum_{\forall tm} q2_{itatm} \cdot y6_{itatm} \\ &+ \sum_{\forall r} \sum_{\forall m} \sum_{\forall a} \sum_{\forall tm} u1_{rmatm} \cdot y7_{rmatm} \\ &+ \sum_{\forall r} \sum_{\forall s} \sum_{\forall v} \sum_{\forall tm} u2_{rsvtm} \cdot y8_{rsvtm} \end{aligned} \quad (3)$$

تأمین s به مرکز تولید p توسط وسیله حمل tm	
درصد انتشار کربن به‌ازای حمل یک واحد محصول a از مرکز تولید p به مرکز توزیع t توسط وسیله حمل tm	$e2_{ptatm}$
درصد انتشار کربن به‌ازای حمل یک واحد محصول a از مرکز تولید p به مرکز خرده‌فروشی g توسط وسیله حمل tm	$e3_{pgatm}$
درصد انتشار کربن به‌ازای حمل یک واحد محصول a از مرکز توزیع t به مرکز خرده‌فروشی g توسط وسیله حمل tm	$e4_{tgam}$
درصد انتشار کربن به‌ازای حمل یک واحد محصول a از مرکز خرده‌فروشی g به مشتری c توسط وسیله حمل tm	$e5_{gcatm}$
درصد انتشار کربن به‌ازای حمل یک واحد محصول a از مشتری c به مرکز جمع‌آوری j توسط وسیله حمل tm	$ep1_{cjatm}$
درصد انتشار کربن به‌ازای حمل یک واحد محصول a از مرکز جمع‌آوری j به مرکز احیا i توسط وسیله حمل tm	$ep2_{jiatm}$
درصد انتشار کربن به‌ازای حمل یک واحد محصول a از مرکز جمع‌آوری j به مرکز انهدام m توسط وسیله حمل tm	$ep3_{jmatm}$
درصد انتشار کربن به‌ازای حمل یک واحد محصول a از مرکز جمع‌آوری j به مرکز باز یافت r توسط وسیله حمل tm	$ep4_{jratm}$
درصد انتشار کربن به‌ازای حمل یک واحد محصول a از مرکز احیا i به مرکز انهدام m توسط وسیله حمل tm	$ep5_{imatm}$
درصد انتشار کربن به‌ازای حمل یک واحد محصول a از مرکز احیا i به مرکز توزیع t توسط وسیله حمل tm	$ep6_{itatm}$
درصد انتشار کربن به‌ازای حمل یک واحد محصول a از مرکز باز یافت r به مرکز انهدام m توسط وسیله حمل tm	$ep7_{rmatm}$
درصد انتشار کربن به‌ازای حمل یک واحد محصول a از مرکز باز یافت r به مرکز تأمین s توسط وسیله حمل tm	$ep8_{rsatm}$

جدول (۳). متغیرهای تصمیم زنجیره تأمین حلقه بسته سنتی

x_{ap}	مقدار تولید محصول a توسط تولیدکننده p
$x1_{spvtm}$	مقدار ماده خام v که از مرکز تأمین s توسط وسیله حمل tm به مرکز تولید p ارسال می‌شود.
$x2_{ptatm}$	مقدار محصول a که از مرکز تولید p توسط وسیله حمل tm به مرکز توزیع t ارسال می‌شود.
$x3_{pgatm}$	مقدار محصول a که از مرکز تولید p توسط وسیله حمل tm به مرکز خرده‌فروشی g ارسال می‌شود.
$x4_{tgam}$	مقدار محصول a که از مرکز توزیع t توسط وسیله حمل tm به مرکز خرده‌فروشی g ارسال می‌شود.
$x5_{gcatm}$	مقدار محصول a که از مرکز خرده‌فروشی g توسط وسیله حمل tm به مشتری c ارسال می‌شود.
$y1_{cjatm}$	مقدار محصول برگشتی a که از مشتری c توسط وسیله حمل tm به مرکز جمع‌آوری j ارسال می‌شود.
$y2_{jiatm}$	مقدار محصول برگشتی a که از مرکز جمع‌آوری j توسط وسیله حمل tm به مرکز احیا i ارسال می‌شود.
$y3_{jmatm}$	مقدار محصول برگشتی a که از مرکز جمع‌آوری j توسط وسیله حمل tm به مرکز انهدام m ارسال می‌شود.
$y4_{jratm}$	مقدار محصول برگشتی a که از مرکز جمع‌آوری j توسط وسیله حمل tm به مرکز باز یافت r ارسال می‌شود.
$y5_{imatm}$	مقدار محصول برگشتی a که از مرکز احیا i توسط وسیله

$$\sum_{\forall g} \sum_{\forall tm} x4_{tgam} \leq ct_{ta} \times w1_t \quad \forall t, a \quad (18)$$

$$\sum_{\forall c} \sum_{\forall tm} x5_{gcatm} \leq cg_{ga} \times w2_g \quad \forall g, a \quad (19)$$

$$\sum_{\forall c} \sum_{\forall tm} y1_{cjam} \leq cj_{ja} \times w3_j \quad \forall j, a \quad (20)$$

$$\sum_{\forall j} \sum_{\forall tm} y2_{jiam} \leq ci_{ia} \quad \forall i, a \quad (21)$$

$$\sum_{\forall j} \sum_{\forall tm} y4_{jratm} \leq cr_{ra} \quad \forall r, a \quad (22)$$

$$\sum_{\forall j} \sum_{\forall tm} y3_{jmatm} + \sum_{\forall i} \sum_{\forall tm} y5_{imatm} + \sum_{\forall r} \sum_{\forall tm} y7_{rmatm} \leq cm_{ma} \quad \forall m, a \quad (23)$$

$$\sum_{\forall t} \sum_{\forall tm} x2_{ptatm} + \sum_{\forall g} \sum_{\forall tm} x3_{pgatm} \leq x_{ap} \quad \forall p, a \quad (24)$$

$$\begin{aligned} & \sum_{\forall s} \sum_{\forall p} \sum_{\forall v} \sum_{\forall tm} e1_{spvtm} \cdot x1_{spvtm} \\ & + \sum_{\forall p} \sum_{\forall t} \sum_{\forall a} \sum_{\forall tm} e2_{ptatm} \cdot x2_{ptatm} \\ & + \sum_{\forall p} \sum_{\forall g} \sum_{\forall a} \sum_{\forall tm} e3_{pgatm} \cdot x3_{pgatm} \\ & + \sum_{\forall t} \sum_{\forall g} \sum_{\forall a} \sum_{\forall tm} e4_{tgam} \cdot x4_{tgam} \\ & + \sum_{\forall g} \sum_{\forall c} \sum_{\forall a} \sum_{\forall tm} e5_{gcatm} \cdot x5_{gcatm} \\ & + \sum_{\forall c} \sum_{\forall j} \sum_{\forall a} \sum_{\forall tm} ep1_{cjam} \cdot y1_{cjam} \\ & + \sum_{\forall j} \sum_{\forall i} \sum_{\forall a} \sum_{\forall tm} ep2_{jiam} \cdot y2_{jiam} \\ & + \sum_{\forall j} \sum_{\forall m} \sum_{\forall a} \sum_{\forall tm} ep3_{jmatm} \cdot y3_{jmatm} \\ & + \sum_{\forall j} \sum_{\forall r} \sum_{\forall a} \sum_{\forall tm} ep4_{jratm} \cdot y4_{jratm} \\ & + \sum_{\forall i} \sum_{\forall m} \sum_{\forall a} \sum_{\forall tm} ep5_{imatm} \cdot y5_{imatm} \\ & + \sum_{\forall i} \sum_{\forall t} \sum_{\forall a} \sum_{\forall tm} ep6_{itmatm} \cdot y6_{itmatm} \\ & + \sum_{\forall r} \sum_{\forall m} \sum_{\forall a} \sum_{\forall tm} ep7_{rmatm} \cdot y7_{rmatm} \\ & + \sum_{\forall r} \sum_{\forall s} \sum_{\forall v} \sum_{\forall tm} ep8_{rsvtm} \cdot y8_{rsvtm} \\ & + \sum_{\forall a} \sum_{\forall p} co2_{ap} \cdot x_{ap} \leq \varepsilon \\ & \sum_{\forall t} w1_t \geq 1 \end{aligned} \quad (25) \quad (26)$$

$$\sum_{\forall s} \sum_{\forall tm} x1_{spvtm} \geq d1_{pv} \quad \forall p, v \quad (4)$$

$$\sum_{\forall g} \sum_{\forall tm} x5_{gcatm} \geq d2_{ca} \quad \forall c, a \quad (5)$$

$$\sum_{\forall j} \sum_{\forall tm} y1_{cjam} \leq re_{ca} \cdot d2_{ca} \quad \forall c, a \quad (6)$$

$$\begin{aligned} & \sum_{\forall s} \sum_{\forall tm} x1_{spvtm} - \sum_{\forall t} \sum_{\forall tm} x2_{ptatm} \\ & - \sum_{\forall g} \sum_{\forall tm} x3_{pgatm} \geq 0 \quad \forall p, v, a \end{aligned} \quad (7)$$

$$\begin{aligned} & \sum_{\forall c} \sum_{\forall tm} x5_{gcatm} \\ & - \sum_{\forall p} \sum_{\forall tm} x3_{pgatm} - \sum_{\forall t} \sum_{\forall tm} x4_{tgam} = 0 \quad \forall g, a \end{aligned} \quad (8)$$

$$\begin{aligned} & \sum_{\forall g} \sum_{\forall tm} x4_{tgam} \\ & - \sum_{\forall p} \sum_{\forall tm} x2_{ptatm} - \sum_{\forall i} \sum_{\forall tm} y6_{itmatm} = 0 \quad \forall t, a \end{aligned} \quad (9)$$

$$\begin{aligned} & \sum_{\forall c} \sum_{\forall tm} y1_{cjam} - \sum_{\forall i} \sum_{\forall tm} y2_{jiam} \\ & - \sum_{\forall m} \sum_{\forall tm} y3_{jmatm} - \sum_{\forall r} \sum_{\forall tm} y4_{jratm} = 0 \quad \forall j, a \end{aligned} \quad (10)$$

$$\begin{aligned} & \sum_{\forall j} \sum_{\forall tm} y2_{jiam} \\ & - \sum_{\forall m} \sum_{\forall tm} y5_{imatm} - \sum_{\forall t} \sum_{\forall tm} y6_{itmatm} = 0 \quad \forall i, a \end{aligned} \quad (11)$$

$$\begin{aligned} & \sum_{\forall j} \sum_{\forall tm} y4_{jratm} \\ & - \sum_{\forall m} \sum_{\forall tm} y7_{rmatm} - \sum_{\forall s} \sum_{\forall tm} y8_{rsvtm} = 0 \quad \forall t, a \end{aligned} \quad (12)$$

$$\sum_{\forall i} \sum_{\forall tm} y2_{jiam} - \left(si \times \sum_{cm} \sum_{\forall tm} y1_{cjam} \right) = 0 \quad \forall j, a \quad (13)$$

$$\sum_{\forall m} \sum_{\forall tm} y3_{jmatm} - \left(sm \times \sum_{cm} \sum_{\forall tm} y1_{cjam} \right) = 0 \quad \forall j, a \quad (14)$$

$$\begin{aligned} & \sum_{\forall r} \sum_{\forall tm} y4_{jratm} \\ & - \left((1 - si - sm) \times \sum_{cm} \sum_{\forall tm} y1_{cjam} \right) = 0 \quad \forall j, a \end{aligned} \quad (15)$$

$$x_{ap} \leq cp_{pa} \quad \forall p, a \quad (16)$$

$$\sum_{\forall p} \sum_{\forall tm} x1_{spvtm} \leq cs_{sv} \quad \forall s, v \quad (17)$$

کرد و در نهایت برای مراکز توزیع و خرده‌فروشی ارسال کرد. تعادل جریان مربوط به مراکز خرده‌فروشی از طریق رابطه (۸) محاسبه می‌شود، و این‌گونه این موضوع را بیان می‌کند که مجموع محصولات ارسال شده از مراکز خرده‌فروشی به مشتری باید برابر با مجموع محصولات وارد شده به این مراکز از طریق مراکز تولید و مراکز توزیع باشد. برای مراکز توزیع نیز معادله تعادل جریان به‌گونه‌ای بیان می‌شود که تعداد محصولات وارد شده از سمت مراکز تولید و احیاء باید برابر با تعداد محصولات خارج شده از این مرکز باشد، که این مورد به‌وسیله‌ی رابطه (۹) نشان داده می‌شود. این محدودیت برای سایر مراکز از جمله مراکز جمع‌آوری، مراکز احیاء و مراکز بازیافت به‌ترتیب توسط روابط (۱۰)، (۱۱) و (۱۲) بیان شده است.

محدودیت‌های (۱۳) تا (۱۵)، کسر محصولات در زنجیره برگشت: محصولاتی که در زنجیره برگشت جریان دارند نمی‌توانند همه فقط به یک مرکز منتقل شوند. توسط ضریب‌های تعریف شده، محصولات بعد از مرکز جمع‌آوری بین سه مراکز احیاء، انهدام و بازیافت تقسیم می‌شوند؛ که به‌ترتیب توسط روابط (۱۳)، (۱۴) و (۱۵) نشان داده می‌شوند.

محدودیت‌های (۱۶) تا (۲۳)، ظرفیت مراکز: ظرفیت هر یک از مراکز محدود و مشخص است. به منظور جلوگیری از استفاده بیش از ظرفیت مراکز این محدودیت‌ها مورد استفاده قرار می‌گیرند. رابطه‌های (۱۶) تا (۲۳) به‌ترتیب محدودیت ظرفیت مراکز تولیدکننده، تأمین‌کننده، توزیع، خرده‌فروشی، جمع‌آوری، احیاء، بازیافت و انهدام را بیان می‌کند.

محدودیت (۲۴)، میزان ارسال: مقدار محصول ارسالی از مراکز تولیدکننده به مراکز خرده‌فروشی و مراکز توزیع، نمی‌تواند بیش‌تر از مقدار تولید آن محصول باشد.

محدودیت (۲۵)، حداکثر کربن مجاز آزاد شده: مطابق رابطه (۲۵) میزان کربن منتشر شده در هوا توسط خودروهای حمل‌ونقل و مراکز تولیدکننده به‌علت تولید محصول، نامقدار مشخصی مجاز می‌باشد.

محدودیت‌های (۲۶) تا (۲۸)، احداث مراکز بالقوه: حداقل باید یک مرکز، از هر یک از مراکز بالقوه احداث گردد. روابط (۲۶)، (۲۷) و (۲۸) به‌ترتیب احداث مراکز توزیع، خرده‌فروشی و جمع‌آوری را بیان می‌کند. محدودیت‌های (۲۹) و (۳۰)، محدوده‌ی متغیرها: این دو رابطه محدوده و انواع متغیرها را بیان می‌کند.

۲-۱-۲. شبکه زنجیره تأمین حلقه بسته با بهره‌گیری از فناوری ابری در مدل پیشرفته، فناوری ابری به‌عنوان یک عامل کلیدی برای بهبود عملکرد زنجیره تأمین معرفی شده است. برخی از مراکز فیزیکی، مانند مراکز بالقوه توزیع، خرده‌فروشی و جمع‌آوری حذف شده و داده‌های مربوط به این مراکز در زیرساخت‌های ابری ذخیره و پردازش می‌شوند. این داده‌ها شامل اطلاعات سفارش‌گذاری، قیمت‌گذاری، موجودی محصولات، دلایل مرجوعی و فرآیند پرداخت است.

نوع ابر مورد استفاده بسته به حساسیت و ماهیت اطلاعات، یکی از سه حالت زیر انتخاب می‌شود:

$$\sum_{\forall g} w2_g \geq 1 \quad (27)$$

$$\sum_{\forall j} w3_j \geq 1 \quad (28)$$

$$x_{ap}, x1_{spvtm}, x2_{ptatm}, x3_{pgatm}, x4_{tgatm}, x5_{gcat} \\ y1_{cjatm}, y2_{jiatm}, y3_{jmatm}, y4_{jratm}, y5_{imatm}, \quad (29)$$

$$y6_{itmatm}, y7_{rmatm}, y8_{rsvtm} \geq 0 \\ w1_t, w2_g, w3_j \in \{0,1\} \quad (30)$$

هزینه‌های مورد استفاده برای برطرف کردن تقاضای مشتریان شامل هزینه‌های احداث، هزینه‌های حمل‌ونقل مواد خام و محصولات و هزینه تولید محصولات می‌باشد.

رابطه (۱)، هزینه احداث تسهیلات: تأسیس یک مرکز جدید (مانند توزیع‌کننده، خرده‌فروشی یا مرکز جمع‌آوری) در شبکه زنجیره تأمین، معمولاً مستلزم هزینه‌های ثابت قابل توجهی است. این هزینه‌ها شامل مواردی همچون خرید زمین، هزینه‌های ساخت‌وساز، و ایجاد زیرساخت‌های لازم می‌شوند. فرض بر این است که برای هر موقعیت بالقوه، هزینه‌ها و ظرفیت‌های ثابت از پیش تعیین‌شده و مشخص هستند. بنابراین، هزینه‌های ثابت تنها در صورتی لحاظ می‌شوند که مرکز موردنظر در مکان مذکور تأسیس گردد.

رابطه (۲)، هزینه تولید محصول: پس از ورود مواد اولیه به مرکز تولید، مجموعه‌ای از عملیات تولیدی برای تبدیل این مواد خام به محصولات نهایی انجام می‌شود. در مدل موردنظر، هزینه‌های مربوط به انجام این عملیات تولیدی، به‌همراه هزینه‌های خرید مواد اولیه، به‌عنوان هزینه‌های کل تولید درنظر گرفته شده‌اند.

رابطه (۳)، هزینه حمل‌ونقل: انتقال مواد خام از تأمین‌کننده به مراکز تولید و همچنین پس از تولید محصولات نهایی، فرآیند حمل‌ونقل برای انتقال این محصولات انجام می‌شود. در مدل موردنظر، هزینه‌های حمل‌ونقل شامل هزینه‌های مرتبط با جابجایی محصولات از مبدأ به مقصد است. این هزینه‌ها بسته به حجم محموله و روش حمل‌ونقل مورد استفاده متغیر بوده و به‌عنوان یکی از اجزای مهم هزینه‌های کل در زنجیره تأمین درنظر گرفته می‌شوند.

محدودیت‌های ذکر شده به مواردی همچون برطرف کردن تقاضا، حداقل محصول برگشتی از مشتری، معادلات تعادل جریان، محدودیت‌های ظرفیت و محدودیت ساخت مراکز اشاره می‌کند.

محدودیت‌های (۴) و (۵)، برطرف کردن تقاضا: مطابق معادله (۴) تقاضای به‌وجود آمده از طرف تولیدکننده باید به‌طور کامل توسط تأمین‌کننده پاسخ داده شود؛ و همچنین رابطه (۵) نیز تأکید بر برآورده کردن تقاضای مشتری دارد.

محدودیت (۶)، حداقل محصول برگشتی از مشتری: محصولاتی که برای مشتری در زنجیره رفت ارسال می‌شود، تنها بخشی از آن‌ها می‌توانند توسط مشتری در زنجیره برگشت به مراکز جمع‌آوری ارسال شود.

محدودیت‌های (۷) تا (۱۲)، معادلات تعادل جریان: رابطه (۷) تعادل جریان در مراکز تولید را این‌گونه بیان می‌کند که به‌همان میزان مواد اولیه فرستاده شده از طرف تأمین‌کننده، می‌توان محصول تولید

(۱) ابر عمومی: برای ذخیره و پردازش اطلاعاتی با دسترسی عمومی و اشتراک‌گذاری گسترده مانند سفارشات و موجودی‌ها

(۲) ابر خصوصی: برای اطلاعات حساس مانند داده‌های مربوط به مشتریان و فرآیندهای داخلی

(۳) ابر ترکیبی: برای بهره‌گیری همزمان از مزایای ابر عمومی و خصوصی، به‌ویژه در شرایطی که برخی داده‌ها نیاز به پردازش در محیطی امن‌تر دارند.

مشخصات و مفروضات مسأله قبلی پابرجاست و مفروضات جدید به شرح زیر می‌باشد:

- تمامی تقاضاها برای خدمات باید به‌طور کامل تأمین شوند.
- ظرفیت میزان حافظه و ظرفیت پردازشی محدود و مشخص است.
- بیشینه انرژی الکتریکی مصرفی مجاز محدود و مشخص است.
- ماکزیمم بودجه قابل استفاده برای خدمات ابری محدود و مشخص است.
- هر خدمت فقط بروی یک ابر و یک سرویس‌دهنده قابل انجام است.
- در صورت فعال بودن سرویس‌دهنده، خدمات می‌توانند به آن تخصیص یابند.

جدول (۴). مجموعه‌های زنجیره‌تأمین حلقه بسته ابری

V	مجموعه مواد خام
A	مجموعه محصولات
S	مجموعه نقاط ثابت مراکز تأمین‌کننده
P	مجموعه نقاط ثابت مراکز تولیدکننده
C	مجموعه نقاط ثابت مشتری
I	مجموعه نقاط ثابت مراکز احیاء
M	مجموعه نقاط ثابت مراکز انهدام
R	مجموعه نقاط ثابت مراکز بازیافت
Tm	مجموعه نقاط نوع حمل‌ونقل
SE	شاخص نوع خدمت
SY	شاخص نوع ابر
SK	شاخص سرویس‌دهنده

جدول (۵). پارامترهای زنجیره‌تأمین حلقه بسته ابری

$d1_{pv}$	تقاضای تولیدکننده p از ماده خام v
$d2_{ca}$	تقاضای مشتری c از محصول a
re_{ca}	نرخ بازگشتی از مراکز مشتری c از محصول a
sm	متوسط کسر محصولات انهدامی
si	متوسط کسر محصولات احیاء
fp_{ap}	هزینه تولید یک واحد محصول a توسط مرکز تولید p
e_{spvmtm}	هزینه حمل یک واحد ماده خام v از مرکز تأمین s به مرکز تولید p توسط وسیله حمل tm
b_{pcatm}	هزینه حمل یک واحد محصول a از مرکز تولید p به مرکز مشتری c توسط وسیله حمل tm
$o1_{clatm}$	هزینه حمل یک واحد محصول برگشتی a از مرکز مشتری c

$o2_{cmatm}$	به مرکز احیاء i توسط وسیله حمل tm هزینه حمل یک واحد محصول برگشتی a از مرکز مشتری c به مرکز انهدام m توسط وسیله حمل tm
$o3_{cratm}$	به مرکز بازیافت r توسط وسیله حمل tm هزینه حمل یک واحد محصول برگشتی a از مرکز مشتری c به مرکز انهدام m توسط وسیله حمل tm
$q1_{imatm}$	به مرکز احیاء i به مرکز انهدام m توسط وسیله حمل tm
$q2_{icatm}$	به مرکز مشتری c توسط وسیله حمل tm هزینه حمل یک واحد محصول برگشتی a از مرکز احیاء i به مرکز مشتری c توسط وسیله حمل tm
$u1_{rmatr}$	به مرکز انهدام m توسط وسیله حمل tm هزینه حمل یک واحد محصول برگشتی a از مرکز بازیافت r به مرکز انهدام m توسط وسیله حمل tm
$u2_{rsatm}$	به مرکز تأمین s توسط وسیله حمل tm هزینه حمل یک واحد محصول برگشتی a از مرکز بازیافت r به مرکز تأمین s توسط وسیله حمل tm
cp_{pa}	ظرفیت تولید مرکز a در مرکز تولید p
cs_{sv}	ظرفیت تأمین ماده خام v توسط مرکز تأمین s
ci_{ia}	ظرفیت احیاء محصول a در مرکز احیاء i
cm_{ma}	ظرفیت انهدام محصول a در مرکز انهدام m
cr_{ra}	ظرفیت بازیافت محصول a در مرکز بازیافت r
ϵ	ماکزیمم کربن مجازی که زنجیره می‌تواند در محیط رها کند
$co2_{ap}$	درصد انتشار کربن به‌ازای تولید یک واحد محصول a توسط تولیدکننده p
$e1_{spvmtm}$	درصد انتشار کربن به‌ازای حمل یک واحد ماده خام v از مرکز تأمین s به مرکز تولید p توسط وسیله حمل tm
$e2_{pcatm}$	درصد انتشار کربن به‌ازای حمل یک واحد محصول a از مرکز تولید p به مرکز مشتری c توسط وسیله حمل tm
$ep1_{ciatm}$	درصد انتشار کربن به‌ازای حمل یک واحد محصول a از مشتری c به مرکز احیاء i توسط وسیله حمل tm
$ep2_{cma}$	درصد انتشار کربن به‌ازای حمل یک واحد محصول a از مشتری c به مرکز انهدام m توسط وسیله حمل tm
$ep3_{crat}$	درصد انتشار کربن به‌ازای حمل یک واحد محصول a از مشتری c به مرکز بازیافت r توسط وسیله حمل tm
$ep4_{imat}$	درصد انتشار کربن به‌ازای حمل یک واحد محصول a از مرکز احیاء i به مرکز انهدام m توسط وسیله حمل tm
$ep5_{icat}$	درصد انتشار کربن به‌ازای حمل یک واحد محصول a از مرکز احیاء i به مشتری c توسط وسیله حمل tm
$ep6_{rma}$	بازیافت r به مرکز انهدام m توسط وسیله حمل tm درصد انتشار کربن به‌ازای حمل یک واحد محصول a از مرکز بازیافت r به مرکز تأمین s توسط وسیله حمل tm
$ep7_{rsvt}$	تعداد تقاضا از خدمت se
DC_{se}	هزینه پردازش در ابر sy و سرویس‌دهنده sk
COM_{sy}	هزینه اشغال حافظه در ابر sy و سرویس‌دهنده sk
$DTC_{sy s}$	حداکثر بودجه برای انجام کار se
BG_{se}	میزان پردازش موردنیاز برای انجام کار se
$CPU1_{se}$	ظرفیت پردازشی سرویس‌دهنده sk
$CPU2_{sk}$	میزان حافظه موردنیاز برای انجام کار se
$MEM1_s$	

$$\begin{aligned}
F_2 &= \sum_{\forall s} \sum_{\forall p} \sum_{\forall v} \sum_{\forall tm} e_{spvmtm} \cdot x1_{spvmtm} \\
&+ \sum_{\forall p} \sum_{\forall c} \sum_{\forall a} \sum_{\forall tm} b_{pcatm} \cdot x2_{pcatm} \\
&+ \sum_{\forall c} \sum_{\forall i} \sum_{\forall a} \sum_{\forall tm} o1_{ciatm} \cdot y1_{ciatm} \\
&+ \sum_{\forall c} \sum_{\forall m} \sum_{\forall a} \sum_{\forall tm} o2_{cmatm} \cdot y2_{cmatm} \\
&+ \sum_{\forall c} \sum_{\forall r} \sum_{\forall a} \sum_{\forall tm} o3_{cratm} \cdot y3_{cratm} \\
&+ \sum_{\forall i} \sum_{\forall m} \sum_{\forall a} \sum_{\forall tm} q1_{imatm} \cdot y4_{imatm} \\
&+ \sum_{\forall i} \sum_{\forall c} \sum_{\forall a} \sum_{\forall tm} q2_{icatm} \cdot x3_{icatm} \\
&+ \sum_{\forall r} \sum_{\forall m} \sum_{\forall a} \sum_{\forall tm} u1_{rmatm} \cdot y5_{rmatm} \\
&+ \sum_{\forall r} \sum_{\forall s} \sum_{\forall a} \sum_{\forall tm} u2_{rsvmtm} \cdot x4_{rsvmtm}
\end{aligned} \quad (32)$$

$$F_3 = \sum_{\forall se} \sum_{\forall sy} \sum_{\forall sk} CST_{se\ sy\ sk} \cdot yC_{se\ sy\ sk} \quad (33)$$

$$F_4 = \sum_{\forall sy} \sum_{\forall sk} COST_{sy\ sk} \cdot MC_{sy\ sk} \quad (34)$$

$$F_5 = \sum_{\forall se} \sum_{\forall sy} \sum_{\forall sk} CEC_{sk} \cdot EC_{sk} \cdot yC_{se\ sy\ sk} \quad (35)$$

$$\sum_{\forall s} \sum_{\forall tm} x1_{spvmtm} \geq d1_{pv} \quad \forall p, v \quad (36)$$

$$\sum_{\forall p} \sum_{\forall tm} x2_{pcatm} + \sum_{\forall i} \sum_{\forall tm} x3_{icatm} \geq d2_{ca} \quad \forall c, a \quad (37)$$

$$\begin{aligned}
&\sum_{\forall i} \sum_{\forall tm} y1_{ciatm} + \sum_{\forall m} \sum_{\forall tm} y2_{cmatm} \\
&\quad + \sum_{\forall r} \sum_{\forall tm} y3_{cratm} \\
&\leq re_{ca} \cdot d2_{ca} \quad \forall c, a \quad (38)
\end{aligned}$$

$$\sum_{\forall s} \sum_{\forall tm} x1_{spvmtm} - \sum_{\forall c} \sum_{\forall tm} x2_{pcatm} \geq 0 \quad \forall p, v, a \quad (39)$$

$$\begin{aligned}
&\sum_{\forall c} \sum_{\forall tm} y1_{ciatm} - \sum_{\forall c} \sum_{\forall tm} x3_{icatm} \\
&\quad - \sum_{\forall m} \sum_{\forall tm} y4_{imatm} = 0 \quad \forall i, a \quad (40)
\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
&\sum_{\forall c} \sum_{\forall tm} y3_{cratm} - \sum_{\forall m} \sum_{\forall tm} y5_{rmatm} \\
&\quad - \sum_{\forall s} \sum_{\forall tm} x4_{rsvmtm} = 0 \quad \forall r, v, a \quad (41)
\end{aligned}$$

$MEM2_s$	ظرفیت حافظه سرویس دهنده sk
EC_{max}	بیشینه مصرف انرژی سرویس دهنده sk
EC_{sk}	مصرف انرژی پویا سرویس دهنده sk
$CST_{se\ sy}$	هزینه انجام خدمت se در ابر sy و سرویس دهنده sk
CEC_{sk}	هزینه مصرف انرژی در سرویس دهنده sk
$COST_{sy}$	هزینه راه اندازی ابر sy در سرویس دهنده sk
$AC_{se\ sy}$	اگر خدمت se به ابر sy در سرویس دهنده sk نیاز داشته باشد یک، در غیر این صورت صفر

جدول (۶). متغیرهای تصمیم زنجیره تأمین حلقه بسته ابری

x_{ap}	مقدار تولید محصول a توسط تولیدکننده p
$x1_{spvmtm}$	مقدار ماده خام v که از مرکز تأمین s توسط وسیله حمل tm به مرکز تولید p ارسال می شود
$x2_{pcatm}$	مقدار محصول a که از مرکز تولید p توسط وسیله حمل tm به مشتری c ارسال می شود
$x3_{icatm}$	مقدار محصول a که از مرکز احیا i توسط وسیله حمل tm به مشتری c ارسال می شود
$x4_{rsvmtm}$	مقدار ماده خام v که از مرکز بازیافت r توسط وسیله حمل tm به مرکز تأمین s ارسال می شود
$y1_{ciatm}$	مقدار محصول برگشتی a که از مشتری c توسط وسیله حمل tm به مرکز احیا i ارسال می شود
$y2_{cmatm}$	مقدار محصول برگشتی a که از مشتری c توسط وسیله حمل tm به مرکز انهدام m ارسال می شود.
$y3_{cratm}$	مقدار محصول برگشتی a که از مشتری c توسط وسیله حمل tm به مرکز بازیافت r ارسال می شود.
$y4_{imatm}$	مقدار محصول برگشتی a که از مرکز احیا i توسط وسیله حمل tm به مرکز انهدام m ارسال می شود.
$y5_{rmatm}$	مقدار محصول برگشتی a که از مرکز بازیافت r توسط وسیله حمل tm به مرکز انهدام m ارسال می شود.
$yC_{se\ sy\ sk}$	حجم خدمت se در ابر sy و سرویس دهنده sk انجام شود
ACT_{sk}	اگر سرویس دهنده sk استفاده شود یک، در غیر این صورت صفر
$MC_{sy\ sk}$	اگر ابر sy در سرویس دهنده sk فعال شود یک، در غیر این صورت صفر

مدل ریاضی پیشنهادی

مدل ریاضی با در نظر گرفتن محدودیت های ابری به صورت زیر می باشد:

$$\text{Min } F = F_1 + F_2 + F_3 + F_4 + F_5$$

$$F_1 = \sum_{\forall a} \sum_{\forall p} f_{pap} \cdot x_{ap} \quad (31)$$

$$CST_{se\ sy\ sk} = (CPU1_{se} \cdot COM_{sy\ sk}) + (MEM1_{se} \cdot DTC_{sy\ sk}) \quad \forall se, sy, sk \quad (55)$$

$$\sum_{\forall sy} \sum_{\forall sk} CST_{se\ sy\ sk} \cdot yC_{se\ sy\ sk} \leq BG_{se} \quad \forall se \quad (56)$$

$$\sum_{\forall sy} MC_{sy\ sk} \leq 1 \quad \forall sk \quad (57)$$

$$\sum_{\forall sy} MC_{sy\ sk} \geq ACT_{sk} \quad \forall sk \quad (58)$$

$$\begin{aligned} & \sum_{\forall s} \sum_{\forall p} \sum_{\forall v} \sum_{\forall tm} e1_{spv\ tm} \cdot x1_{spv\ tm} \\ & + \sum_{\forall p} \sum_{\forall c} \sum_{\forall a} \sum_{\forall tm} e2_{pcat\ m} \cdot x2_{pcat\ m} \\ & + \sum_{\forall i} \sum_{\forall c} \sum_{\forall a} \sum_{\forall tm} ep5_{icat\ m} \cdot x3_{icat\ m} \\ & + \sum_{\forall r} \sum_{\forall s} \sum_{\forall a} \sum_{\forall tm} ep7_{rsvt\ m} \cdot x4_{rsvt\ m} \\ & + \sum_{\forall c} \sum_{\forall i} \sum_{\forall a} \sum_{\forall tm} ep1_{ciat\ m} \cdot y1_{ciat\ m} \\ & + \sum_{\forall c} \sum_{\forall m} \sum_{\forall a} \sum_{\forall tm} ep2_{cmat\ m} \cdot y2_{cmat\ m} \\ & + \sum_{\forall c} \sum_{\forall r} \sum_{\forall a} \sum_{\forall tm} ep3_{crat\ m} \cdot y3_{crat\ m} \\ & + \sum_{\forall i} \sum_{\forall m} \sum_{\forall a} \sum_{\forall tm} ep4_{imat\ m} \cdot y4_{imat\ m} \\ & + \sum_{\forall r} \sum_{\forall m} \sum_{\forall a} \sum_{\forall tm} ep6_{rmat\ m} \cdot y5_{rmat\ m} \\ & + \sum_{\forall a} \sum_{\forall p} co2_{ap} \cdot x_{ap} \leq \varepsilon \end{aligned} \quad (59)$$

$$x_{ap}, x1_{spv\ tm}, x2_{pcat\ m}, x3_{icat\ m}, x4_{rsvt\ m}, y1_{ciat\ m}, y2_{cmat\ m}, y3_{crat\ m}, y4_{imat\ m}, y5_{rmat\ m}, yC_{se\ sy\ sk} \geq 0 \quad (60)$$

$$MC_{sy\ sk}, ACT_{sk} \in \{0,1\} \quad (61)$$

هزینه‌های مورد استفاده برای برطرف کردن تقاضای مشتریان شامل هزینه تولید محصولات، هزینه‌های حمل‌ونقل مواد خام و محصولات، هزینه انجام خدمت در ابر موجود در سرویس‌دهنده، هزینه راه‌اندازی ابر در سرویس‌دهنده و هزینه انرژی الکتریکی می‌باشد.

رابطه (۳۱)، هزینه تولید محصول: پس از ورود مواد اولیه به مرکز تولید، مجموعه‌ای از عملیات تولیدی برای تبدیل این مواد خام به محصولات نهایی انجام می‌شود. در مدل موردنظر، هزینه‌های مربوط به انجام این عملیات تولیدی، به همراه هزینه‌های خرید مواد اولیه، به عنوان هزینه‌های کل تولید در نظر گرفته شده‌اند.

رابطه (۳۲)، هزینه حمل‌ونقل: انتقال مواد خام از تأمین‌کننده به مراکز تولید و همچنین پس از تولید محصولات نهایی، فرآیند حمل‌ونقل برای انتقال این محصولات انجام می‌شود. در مدل موردنظر، هزینه‌های حمل‌ونقل شامل هزینه‌های مرتبط با جابجایی محصولات از مبدأ به مقصد است. این هزینه‌ها بسته به حجم محموله و روش حمل‌ونقل مورد استفاده متغیر بوده و به عنوان یکی از اجزای مهم هزینه‌های کل در زنجیره تأمین در نظر گرفته می‌شوند.

$$\begin{aligned} & \sum_{\forall c} \sum_{\forall i} \sum_{\forall tm} y1_{ciat\ m} \\ & - si \cdot \left(\sum_{\forall c} \sum_{\forall i} \sum_{\forall tm} y1_{ciat\ m} \right. \\ & + \sum_{\forall c} \sum_{\forall m} \sum_{\forall tm} y2_{cmat\ m} \\ & \left. + \sum_{\forall c} \sum_{\forall r} \sum_{\forall tm} y3_{crat\ m} \right) \\ & = 0 \quad \forall a \end{aligned} \quad (42)$$

$$\begin{aligned} & \sum_{\forall c} \sum_{\forall m} \sum_{\forall tm} y2_{cmat\ m} \\ & - sm \cdot \left(\sum_{\forall c} \sum_{\forall i} \sum_{\forall tm} y1_{ciat\ m} \right. \\ & + \sum_{\forall c} \sum_{\forall m} \sum_{\forall tm} y2_{cmat\ m} \\ & \left. + \sum_{\forall c} \sum_{\forall r} \sum_{\forall tm} y3_{crat\ m} \right) = 0 \quad \forall a \end{aligned} \quad (43)$$

$$\begin{aligned} & \sum_{\forall c} \sum_{\forall r} \sum_{\forall tm} y3_{crat\ m} \\ & - (1 - si - sm) \cdot \left(\sum_{\forall c} \sum_{\forall i} \sum_{\forall tm} y1_{ciat\ m} \right. \\ & + \sum_{\forall c} \sum_{\forall m} \sum_{\forall tm} y2_{cmat\ m} \\ & \left. + \sum_{\forall c} \sum_{\forall r} \sum_{\forall tm} y3_{crat\ m} \right) = 0 \quad \forall a \end{aligned} \quad (44)$$

$$x_{ap} \leq cp_{pa} \quad \forall p, a \quad (45)$$

$$\sum_{\forall p} \sum_{\forall tm} x1_{spv\ tm} \leq cs_{sv} \quad \forall s, v \quad (46)$$

$$\sum_{\forall c} \sum_{\forall tm} y1_{ciat\ m} \leq ci_{ia} \quad \forall i, a \quad (47)$$

$$\sum_{\forall c} \sum_{\forall tm} y3_{crat\ m} \leq cr_{ra} \quad \forall r, a \quad (48)$$

$$\begin{aligned} & \sum_{\forall c} \sum_{\forall tm} y2_{cmat\ m} + \sum_{\forall i} \sum_{\forall tm} y4_{imat\ m} \\ & + \sum_{\forall r} \sum_{\forall tm} y5_{rmat\ m} \leq cm_{ma} \quad \forall m, a \end{aligned} \quad (49)$$

$$\sum_{\forall c} \sum_{\forall tm} x2_{pcat\ m} \leq x_{ap} \quad \forall p, a \quad (50)$$

$$\sum_{\forall sy} \sum_{\forall sk} AC_{se\ sy\ sk} \cdot yC_{se\ sy\ sk} \cdot MC_{sy\ sk} \geq DC_{se} \quad \forall se \quad (51)$$

$$\sum_{\forall se} CPU1_{se} \cdot yC_{se\ sy\ sk} \leq CPU2_{sk} \cdot MC_{sy\ sk} \quad \forall sy, sk \quad (52)$$

$$\sum_{\forall se} MEM1_{se} \cdot yC_{se\ sy\ sk} \leq MEM2_{sk} \cdot MC_{sy\ sk} \quad \forall sy, sk \quad (53)$$

$$\sum_{\forall se} \sum_{\forall sy} EC_{sk} \cdot yC_{se\ sy\ sk} \leq ECmax_{sk} \cdot ACT_{sk} \quad \forall sk \quad (54)$$

مراکز احیاء و مراکز بازیافت به ترتیب توسط روابط (۴۰) و (۴۱) بیان شده است.

محدودیت‌های (۴۲) تا (۴۴)، کسر محصولات در زنجیره برگشت: محصولاتی که در زنجیره برگشت جریان دارند نمی‌تواند همه فقط به یک مرکز منتقل شوند. توسط ضریب‌های تعریف شده، محصولات از مراکز مشتری بین سه مراکز احیاء، انهدام و بازیافت تقسیم می‌شوند؛ که به ترتیب توسط روابط (۴۲)، (۴۳) و (۴۴) نشان داده می‌شوند.

محدودیت‌های (۴۵) تا (۴۹)، ظرفیت مراکز: ظرفیت هر یک از مراکز محدود و مشخص است. به منظور جلوگیری از استفاده بیش از ظرفیت مراکز این محدودیت‌ها مورد استفاده قرار می‌گیرند. رابطه‌های (۴۵)، (۴۶)، (۴۷)، (۴۸) و (۴۹) به ترتیب محدودیت ظرفیت مراکز تولیدکننده، تأمین‌کننده، احیاء، بازیافت و انهدام را بیان می‌کند.

محدودیت (۵۰)، میزان ارسال: مقدار محصول ارسالی از مراکز تولیدکننده به مراکز مشتری، نمی‌تواند بیشتر از مقدار تولید آن محصول باشد.

محدودیت‌های ابری

محدودیت (۵۱)، برطرف کردن تقاضا: این رابطه بیان می‌کند که تمامی تقاضاها از یک خدمت باید برآورده شوند.

محدودیت‌های (۵۲) و (۵۳)، ظرفیت میزان حافظه و ظرفیت پردازشی: ظرفیت میزان حافظه و پردازشی سرویس‌دهنده‌ها محدود و مشخص است. به منظور جلوگیری از استفاده بیش از ظرفیت‌های نام برده شده این محدودیت‌ها مورد استفاده قرار می‌گیرند. رابطه‌های (۵۲) و (۵۳) به ترتیب محدودیت ظرفیت میزان حافظه و ظرفیت پردازشی سرویس‌دهنده‌ها را بیان می‌کند.

محدودیت (۵۴)، مصرف انرژی: به منظور آن که میزان انرژی مصرفی به جهت اتمام کلیه خدمات نباید بیشتر از مقدار انرژی بیشینه مجاز باشد، از این عبارت استفاده می‌شود. به بیان دیگر این رابطه به منظور کنترل مصرف انرژی الکتریکی است.

محدودیت (۵۵)، هزینه انجام خدمت: این رابطه هزینه انجام خدمت در ابر و سرویس‌دهنده را با توجه به هزینه‌های پردازش خدمت و هزینه اشغال حافظه در ابر و سرویس‌دهنده را بیان می‌کند.

محدودیت (۵۶)، کنترل بودجه: به منظور آن که هزینه‌های مصرفی به جهت اتمام کلیه خدمات نباید بیشتر از بودجه تعیین شده باشد، از این عبارت استفاده می‌شود. به بیان دیگر این رابطه به منظور کنترل بودجه است.

محدودیت‌های (۵۷) و (۵۸)، تخصیص خدمت: رابطه (۵۷) بیان می‌کند که هر خدمت فقط بر روی یک ابر و یک سرویس‌دهنده قابل انجام است. همچنین رابطه (۵۸) این مفهوم را بیان می‌کند که زمانی خدمت می‌تواند به یک سرویس‌دهنده تخصیص داده شود که آن سرویس‌دهنده فعال باشد.

محدودیت (۵۹)، حداکثر کربن مجاز آزاد شده: مطابق رابطه (۵۹) میزان کربن منتشر شده در هوا توسط خودروهای حمل و نقل و مراکز تولیدکننده به علت تولید محصول، تا مقدار مشخصی مجاز می‌باشد.

رابطه (۳۳)، هزینه انجام خدمت در ابر موجود در سرویس‌دهنده: یکی از مهم‌ترین هزینه‌هایی که در این تحقیق مورد بررسی قرار می‌گیرد، هزینه انجام خدمت در بستر ابری است. این هزینه براساس میزان استفاده از منابع زیرساختی ابر که توسط سرویس‌دهنده ارائه می‌شود، تعیین می‌گردد. در واقع، هر خدمت ابری بسته به نوع، حجم داده‌ها، و میزان منابع پردازشی موردنیاز، هزینه متفاوتی دارد. این هزینه‌ها معمولاً به صورت پرداخت براساس مصرف محاسبه می‌شوند، به این معنا که کاربر تنها به میزان استفاده از خدمات هزینه پرداخت می‌کند. در این روش، هرچه میزان داده‌های پردازش شده یا ذخیره شده بیشتر باشد و منابع بیشتری از ابر در اختیار خدمت قرار گیرد، هزینه انجام آن خدمت نیز افزایش خواهد یافت.

رابطه (۳۴)، هزینه راه‌اندازی ابر در سرویس‌دهنده: یکی دیگر از هزینه‌های مهم مورد بررسی در این تحقیق، هزینه راه‌اندازی ابر در سرویس‌دهنده است. این هزینه شامل مجموعه‌ای از مبالغ مرتبط با فعال‌سازی و پیاده‌سازی زیرساخت ابری در سرویس‌دهنده می‌شود. در واقع، زمانی که یک ابر در سرویس‌دهنده راه‌اندازی می‌شود، بسته به نوع و ساختار ابر انتخابی، هزینه‌های متفاوتی برای فعال‌سازی و پیکربندی اولیه در نظر گرفته می‌شود.

رابطه (۳۵)، هزینه انرژی الکتریکی: کاهش مصرف انرژی الکتریکی در سرویس‌دهنده‌های ابری به منظور دستیابی به پایداری زیست‌محیطی و حرکت به سمت مراکز داده سبز یکی از اهداف کلیدی در مسأله مورد بررسی است. مدیریت مصرف انرژی بهینه در زیرساخت‌های ابری، به دلیل نقش پررنگ این مراکز در مصرف جهانی انرژی، از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است. با توجه به این موضوع، یک ضریب هزینه‌ای برای میزان مصرف انرژی الکتریکی تعریف شده است که این ضریب بیانگر تأثیر مستقیم مصرف انرژی بر هزینه‌های عملیاتی و زیست‌محیطی است. بنابراین، هدف اصلی مسأله، به حداقل رساندن این هزینه از طریق اعمال روش‌های بهینه‌سازی مصرف انرژی است.

محدودیت‌های ذکر شده به مواردی همچون برطرف کردن تقاضا، حداقل محصول برگشتی از مشتری، معادلات تعادل جریان، محدودیت‌های ظرفیت و محدودیت ابری اشاره می‌کند.

محدودیت‌های (۳۶) و (۳۷)، برطرف کردن تقاضا: مطابق معادله (۳۶) تقاضای به وجود آمده از طرف تولیدکننده باید به طور کامل توسط تأمین‌کننده پاسخ داده شود؛ و همچنین رابطه (۳۷) نیز تأکید بر برآورده کردن تقاضای مشتری دارد.

محدودیت (۳۸)، حداقل محصول برگشتی از مشتری: محصولاتی که برای مشتری در زنجیره رفت ارسال می‌شود، تنها بخشی از آن‌ها می‌توانند توسط مشتری در زنجیره برگشت به مراکز جمع‌آوری ارسال شود.

محدودیت‌های (۳۹) تا (۴۱)، معادلات تعادل جریان: رابطه (۳۹) تعادل جریان در مراکز تولید را این‌گونه بیان می‌کند که به همان میزان مواد اولیه فرستاده شده از طرف تأمین‌کننده، می‌توان محصول تولید کرد و در نهایت برای مراکز مشتری ارسال کرد. تعادل جریان مربوط به

محدودیت‌های (۶۰) و (۶۱)، محدوده‌ی متغیرها: این دو رابطه محدود و انواع متغیرها را بیان می‌کند.

۳. نتایج محاسباتی

مدل‌های برنامه‌ریزی ریاضی ارائه‌شده با درنظر گرفتن ۲۰ مسئله آزمایشی در ابعاد مختلف به‌وسیله نرم‌افزار گمز نسخه ۲۴.۱.۲ و توسط سالور CPLEX در یک رایانه شخصی با مشخصات سخت‌افزاری Intel® Core™i5 CPU 2.30 GHz، باحافظه اصلی ۸ گیگابایت در محیط ویندوز حل شده است و نتایج قابل‌قبولی نیز ارائه گردید.

برای حل مسئله در ابعاد مختلف، شاخص‌های مسئله به‌تعداد ۲۰ مرتبه به‌صورت تصادفی و با استفاده از اعداد تصادفی تولید شدند. این رویکرد با هدف ایجاد تنوع در شرایط مسئله و بررسی رفتار مدل تحت سناریوهای گوناگون به‌کار گرفته شده است. در هر یک از این حالات، مسئله زنجیره‌تأمین ابری به‌گونه‌ای حل شده است که برای هر پارامتر هزینه مرتبط با فناوری ابری، یک‌بار با مقدار حد بالا و بار دیگر با مقدار حد پایین مورد بررسی قرار گرفته و مقادیر تابع هدف در هر حالت ثبت شده است. علاوه‌بر این، یک‌بار نیز تمامی هزینه‌ها به‌طور همزمان در مقدار حد بالای خود قرار داده شده و مسئله حل شده است. درمجموع، برای هر مجموعه از شاخص‌های تولیدشده، مسئله زنجیره‌تأمین ابری در ۱۰ حالت مختلف حل شده و مقادیر تابع هدف

به‌دست آمده ثبت شده است. درنهایت، میانگین مقادیر تابع هدف حاصل از این ۱۰ مرتبه حل به‌عنوان نتیجه نهایی درنظر گرفته شده است. این میانگین‌گیری، دقت نتایج را افزایش داده و امکان تحلیل بهتر رفتار مدل در شرایط واقعی را فراهم می‌کند.

علاوه‌بر تحلیل مسئله زنجیره‌تأمین در حالت ابری، یک‌بار نیز مدل بدون بهره‌گیری از فناوری ابری و در شرایط مشابه برای هر یک از شاخص‌ها حل شده و مقادیر تابع هدف آن ثبت شده است. این مقایسه به منظور بررسی مزایای احتمالی استفاده از فناوری ابری در بهبود عملکرد زنجیره‌تأمین انجام شده است.

مقادیر شاخص‌های تولید شده در جدول (۷) نمایش داده شده است و نتایج به‌دست آمده از هر بار حل مدل‌های ریاضی پیشنهادی در جدول (۸) ارائه شده‌اند.

نتایج به‌دست آمده از ۲۰ نمونه آزمایش حل شده، نکات ارزشمندی را درخصوص عملکرد مدل ارائه می‌دهد. نخستین نکته قابل‌توجه، افزایش مقدار تابع هدف با بزرگ‌تر شدن ابعاد مسئله است. این موضوع کاملاً قابل پیش‌بینی بوده و نشان‌دهنده آن است که با افزایش تعداد متغیرها و قیود، هزینه کلی زنجیره‌تأمین افزایش می‌یابد. علاوه‌بر این، زمان لازم برای حل مدل نیز به‌طور قابل ملاحظه‌ای افزایش پیدا می‌کند، که این امر بر پیچیدگی محاسباتی مدل تأکید دارد.

جدول (۷). مقادیر شاخص‌های تولید شده در ابعاد مختلف

مدل زنجیره‌تأمین حلقه بسته بدون بهره‌گیری از فناوری ابری													
مدل زنجیره‌تأمین حلقه بسته با بهره‌گیری از فناوری ابری													
ردیف	تعداد مراکز توزیع	تعداد مراکز خرده‌فروشی	تعداد مراکز جمع‌آوری	تعداد تأمین‌کنندگان	تعداد تولیدکنندگان	تعداد مشتری	تعداد مراکز اجا	تعداد مراکز انهدام	تعداد مراکز باز یافت	تعداد نوع محصول	تعداد نوع مواد خام	تعداد نوع خدمت	تعداد سرویس‌دهنده
۱	۴	۷	۸	۲	۳	۱۰	۸	۱	۶	۱	۶	۱	۲
۲	۲	۱	۶	۴	۳	۶	۹	۲	۹	۲	۶	۱	۲
۳	۹	۸	۲	۶	۵	۳	۸	۵	۱۰	۳	۶	۱	۲
۴	۷	۷	۳	۴	۲	۱	۱۰	۶	۵	۴	۶	۲	۴
۵	۱	۵	۲	۶	۳	۱۰	۶	۲	۱۰	۵	۶	۲	۴
۶	۴	۳	۴	۴	۵	۱۰	۵	۵	۷	۶	۶	۲	۴
۷	۳	۸	۲	۲	۲	۶	۴	۱	۸	۷	۶	۳	۴
۸	۶	۱۰	۹	۳	۲	۱۰	۱۰	۴	۶	۸	۶	۳	۴
۹	۴	۹	۷	۱	۹	۱	۸	۱	۱	۹	۶	۳	۴
۱۰	۳	۲	۵	۷	۸	۱۰	۳	۴	۹	۱۰	۶	۳	۴
۱۱	۵۰	۴۱	۲۱	۳۳	۳۸	۴۳	۳۰	۲۶	۴۸	۱۴	۶	۴	۴
۱۲	۳۴	۴۴	۲۱	۴۵	۴۴	۹۴	۲۷	۲۳	۳۴	۱۵	۶	۴	۴
۱۳	۲۲	۳۸	۴۷	۲۳	۳۰	۷۳	۳۲	۵۰	۴۵	۱۱	۶	۴	۵
۱۴	۳۹	۲۶	۲۲	۲۴	۳۱	۶۲	۳۸	۲۸	۴۲	۱۲	۶	۴	۵
۱۵	۲۴	۲۵	۳۰	۲۰	۲۵	۶۷	۲۷	۳۳	۲۲	۱۳	۶	۴	۵
۱۶	۴۲	۲۵	۵۰	۵	۳۳	۳۰	۳۵	۴۴	۵۰	۱۶	۶	۵	۵
۱۷	۴۴	۴۵	۲۳	۴۳	۲۸	۱۴	۲۸	۳۶	۵۰	۱۷	۶	۵	۵
۱۸	۲۹	۲۶	۴۵	۲۹	۳۶	۲۸	۴۹	۲۹	۴۰	۱۸	۶	۵	۶
۱۹	۲۶	۲۱	۴۰	۲۶	۳۲	۴۹	۲۰	۲۱	۳۳	۱۹	۶	۵	۶
۲۰	۳۱	۲۱	۴۸	۳۰	۴۶	۹۳	۲۵	۳۳	۲۹	۲۰	۶	۶	۶

جدول (۸). مقایسه نتایج حل دو مدل زنجیره تأمین

ردیف	ابعاد مسأله	مقدار تابع هدف ابری	زمان حل (ثانیه)	مقدار تابع هدف بدون ابر	زمان حل (ثانیه)
۱	کوچک	۵۷۴,۲۴۸,۵۴۰	<۶۰	۷,۰۵۷,۲۵۳,۰۰۰	<۶۰
۲		۵۵۷,۲۶۳,۶۰۰	<۶۰	۷,۵۸۲,۷۸۰,۰۰۰	<۶۰
۳		۵۵۴,۴۹۱,۴۱۰	<۶۰	۸,۲۹۵,۵۸۳,۰۰۰	<۶۰
۴		۷۴۱,۳۲۳,۰۸۰	<۶۰	۶,۷۴۱,۲۲۰,۰۰۰	<۶۰
۵		۷۲۸,۱۶۴,۰۰۰	<۶۰	۷,۵۰۹,۰۷۴,۰۰۰	<۶۰
۶		۷۴۹,۳۱۴,۱۳۰	<۶۰	۶,۹۴۹,۳۲۹,۰۰۰	<۶۰
۷		۹۳۴,۰۵۲,۴۲۰	<۶۰	۶,۷۵۴,۶۱۱,۰۰۰	<۶۰
۸		۹۳۱,۶۴۲,۷۱۰	<۶۰	۶,۷۷۴,۵۹۲,۰۰۰	<۶۰
۹		۸۹۲,۹۴۹,۸۳۰	<۶۰	۶,۷۴۲,۷۳۸,۰۰۰	<۶۰
۱۰		۱,۰۰۶,۵۷۷,۹۵۰	<۶۰	۶,۱۲۶,۰۰۲,۰۰۰	<۶۰
۱۱	متوسط و بزرگ	۱,۲۳۵,۵۵۱,۸۹۰	۷۴۸	۸,۵۱۲,۱۸۱,۰۰۰	۳۶۲۷
۱۲		۱,۵۹۲,۷۹۶,۸۰۰	۸۷۹	۱۱,۳۴۲,۱۰۰,۰۰۰	۳۶۲۷
۱۳		۱,۴۹۴,۲۴۲,۵۴۲	۱۱۴	۱۰,۱۹۴,۳۰۰,۰۰۰	۳۰۳۴
۱۴		۱,۴۹۱,۹۳۴,۱۰۰	۱۲۸	۹,۵۶۲,۸۷۰,۰۰۰	۱۱۷۴
۱۵		۱,۵۳۶,۷۴۲,۶۰۰	۳۶۷	۱۰,۵۲۵,۳۰۰,۰۰۰	۱۵۷۸
۱۶		۱,۳۴۹,۲۷۷,۳۷۰	۶۴۴	۷,۷۸۸,۱۵۰,۰۰۰	۹۴۱
۱۷		۱,۲۳۲,۷۲۸,۳۳۰	۴۰۳	۷,۲۸۴,۰۲۲,۰۰۰	۲۳۸۴
۱۸		۱,۵۲۴,۸۴۹,۲۰۰	۱۱۹۷	۸,۱۵۷,۱۵۱,۰۰۰	۱۱۶۵
۱۹		۱,۷۲۴,۲۵۶,۱۰۰	۶۱۴	۹,۴۸۳,۷۹۰,۰۰۰	۸۱۵
۲۰		۲,۲۳۹,۲۰۱,۸۰۰	۱۳۶۳	۱۳,۸۹۱,۱۰۰,۰۰۰	۲۲۵۹

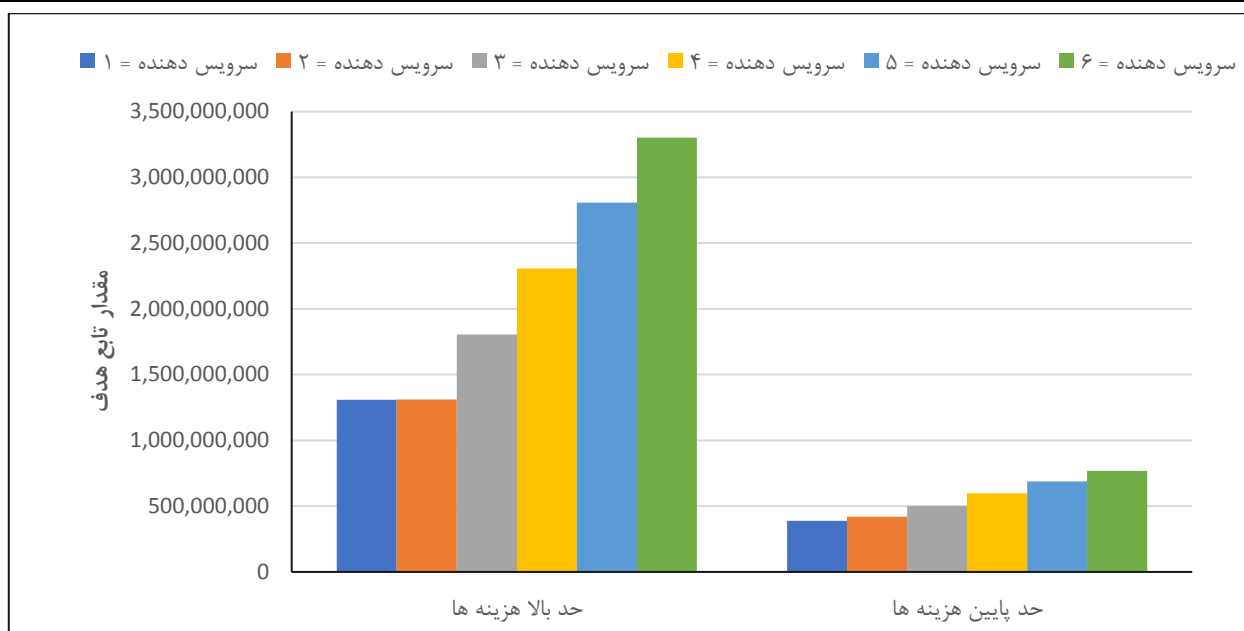
جدول (۹). نتایج حاصل از تأثیر افزایش تعداد سرویس دهنده بر تابع هدف

تعداد سرویس دهنده	۱	۲	۳	۴	۵	۶
حد پایین هزینه	۳۸۷۶۸۸۹۰۰	۴۱۹۵۲۶۲۰۰	۴۹۹۷۰۹۹۰۰	۵۹۸۵۱۷۶۰۰	۶۸۸۹۸۳۴۰۰	۷۶۹۲۹۳۹۰۰
مقدار تابع هدف ابری	۱۳۰۹۶۴۴۰۰۰	۱۳۱۰۰۲۹۰۰۰	۱۸۰۴۹۷۹۰۰۰	۲۳۰۶۰۲۲۰۰۰	۲۸۰۷۲۴۰۰۰۰	۳۳۰۳۰۴۳۰۰۰
حد بالا هزینه						

یکی از مهم‌ترین یافته‌ها، کاهش چشم‌گیر مقدار تابع هدف در مدل زنجیره تأمین حلقه بسته با بهره‌گیری از فناوری ابری، در مقایسه با مدل مشابه بدون استفاده از این فناوری است. در تمامی ۲۰ حالت حل‌شده، مقدار تابع هدف در حالت ابری کمتر بوده است. این کاهش قابل توجه ناشی از حذف مراکز واسطه‌ای میان تولیدکننده و مشتری می‌باشد. احداث و نگهداری این مراکز واسطه‌ای هزینه‌بر بوده و حذف آن‌ها باعث کاهش مستقیم هزینه‌های کلی زنجیره تأمین می‌شود.

همچنین زمان حل مدل برنامه‌ریزی ریاضی در حالت ابری، به‌ویژه در ابعاد بزرگ، به میزان قابل توجهی کمتر از زمان حل مدل بدون فناوری ابری است. این امر نشان‌دهنده کارایی بالاتر مدل زنجیره تأمین ابری در شرایط واقعی و مقیاس‌های بزرگ‌تر است. دلیل اصلی این تفاوت را می‌توان در حذف پیچیدگی‌های ناشی از وجود واسطه‌ها و تمرکز بیشتر بر تولید به موقع و ارسال مستقیم به مشتری دانست.

به‌طور کلی، می‌توان نتیجه گرفت که استفاده از مدل زنجیره تأمین ابری، با در نظر گرفتن تولید به‌موقع، حذف واسطه‌ها و کاهش هزینه‌های مرتبط، تأثیر مثبتی بر عملکرد زنجیره تأمین دارد. این بهبود نه تنها در کاهش هزینه‌های کلی بلکه در کاهش زمان حل مسأله نیز مشهود است. تحلیل حساسیت پارامترهای مهم برای ارزیابی عملکرد مدل در شرایط مختلف، اثر تغییر تعداد سرویس‌دهنده‌ها بر مقدار تابع هدف مدل ابری بررسی شده است. داده‌های ارائه‌شده در جدول (۹) نشان می‌دهند که با افزایش تعداد سرویس‌دهنده‌ها، مقدار تابع هدف به‌طور پیوسته افزایش می‌یابد. این افزایش نشان‌دهنده رابطه مثبت بین تعداد سرویس‌دهنده‌ها و هزینه‌های کل سیستم است. به‌عبارت دیگر، هرچه تعداد سرویس‌دهنده‌ها بیشتر می‌شود، هزینه‌های کلی نیز افزایش می‌یابد. شکل (۲) روند افزایشی را در دو حالت مختلف نشان می‌دهد.



شکل (۲). مقدار تابع هدف براساس تغییرات تعداد سرویس‌دهنده

- از ۱ به ۲ سرویس‌دهنده، تغییرات کوچک است (۳۱,۸۳۷,۳۰۰)، که نشان‌دهنده تغییرات ملایم هزینه‌ها است.
 - از ۲ به ۳ سرویس‌دهنده، افزایش هزینه‌ها بزرگتر می‌شود (۸۰,۱۸۳,۷۰۰).
 - از ۳ به ۴ و از ۴ به ۵، هزینه‌ها همچنان افزایش می‌یابند (حدود ۹۰-۱۰۰ میلیون).
- برای حد بالا هزینه‌ها:
- در ابتدا، از ۱ به ۲ سرویس‌دهنده، تفاوت بسیار کوچک است (۳۸۵,۰۰۰)، که نشان می‌دهد افزایش سرویس‌دهنده در این مرحله تأثیر چندانی بر هزینه‌ها ندارد.
 - از ۲ به ۳ سرویس‌دهنده، تفاوت زیادی مشاهده می‌شود (۴۹۴,۹۵۰,۰۰۰) که این افزایش به وضوح قابل توجه است.
 - از ۳ به ۴، ۴ به ۵، و ۵ به ۶ سرویس‌دهنده‌ها، تغییرات مشابهی به نظر می‌رسد، یعنی هزینه‌ها همچنان به میزان زیادی افزایش می‌یابند (در حدود ۵۰۰ میلیون).
- با توجه به این تفاوت‌ها، مشاهده می‌شود که پس از ۲ سرویس‌دهنده، افزایش تعداد سرویس‌دهنده‌ها باعث افزایش چشم‌گیر هزینه‌ها می‌شود، خصوصاً در حالت حداکثر هزینه‌ها این اتفاق به وضوح دیده می‌شود. این امر نشان‌دهنده این است که بعد از این نقطه، ممکن است افزایش تعداد سرویس‌دهنده‌ها به‌طور غیرضروری هزینه‌ها را افزایش دهد.
- در ادامه تحلیل حساسیت، تأثیر افزایش تعداد نوع خدمت بر مقدار تابع هدف در دو سناریوی حد پایین و حد بالای هزینه‌ها مورد بررسی قرار گرفته است. داده‌های حاصل از این تحلیل در جدول (۱۰) ارائه شده‌اند. به‌طور کلی، مشاهده می‌شود که با افزایش تعداد نوع خدمت، مقدار تابع هدف در هر دو حالت به‌صورت پیوسته افزایش می‌یابد. این روند صعودی تابع هدف را می‌توان به ماهیت خدمات ارائه‌شده و

در اینجا دو حالت مختلف از تابع هدف مورد بررسی قرار گرفته است: یکی در حالتی که تمام هزینه‌ها در کمترین مقدار خود هستند و دیگری در حالتی که هزینه‌ها به حداکثر مقدار خود رسیده‌اند. این بررسی نشان می‌دهد چه‌طور افزایش تعداد سرویس‌دهنده‌ها، هم در سطح هزینه‌های پایین و هم در سطح هزینه‌های بالا، بر تابع هدف تأثیر می‌گذارد. با توجه به داده‌ها، تابع هدف در حالت حداقل هزینه‌ها از ۳۸۷,۶۸۸,۹۰۰ در حالت ۱ سرویس‌دهنده به ۷۶۹,۲۹۳,۹۰۰ در حالت ۶ سرویس‌دهنده افزایش می‌یابد. این افزایش نشان‌دهنده یک روند صعودی است که به‌طور مستقیم به افزایش تعداد سرویس‌دهنده‌ها مرتبط است. این افزایش طبیعی است؛ زیرا در مدل ابری با هزینه‌های کمتر، سیستم می‌تواند از منابع بهینه‌تری استفاده کند و هر سرویس‌دهنده جدید به‌طور مؤثر به کارایی کلی کمک می‌کند.

در حالت حداکثر هزینه‌ها تابع هدف در ابتدا از ۱,۳۰۹,۶۴۴,۰۰۰ در ۱ سرویس‌دهنده به ۳,۳۰۳,۰۴۳,۰۰۰ در ۶ سرویس‌دهنده افزایش می‌یابد، که دقیقاً مشابه روند تغییرات در حالت حداقل هزینه‌ها است. اما این افزایش در اینجا همراه با هزینه‌های بالاتری است. هزینه‌های مربوط به پردازش، ذخیره‌سازی، و سایر منابع ابری در این حالت بیشتر است و به‌طور طبیعی موجب افزایش بیشتر تابع هدف می‌شود. در این حالت، اضافه کردن سرویس‌دهنده‌های بیشتر ممکن است به هزینه‌های اضافی غیرضروری منجر شود و به‌طور خاص به نقطه‌ای برسد که دیگر افزایش سرویس‌دهنده‌ها تأثیر قابل توجهی در بهبود کارایی سیستم نداشته باشد.

برای شناسایی نقطه‌ای که بعد از آن افزایش تعداد سرویس‌دهنده‌ها به‌طور غیرضروری هزینه‌ها را افزایش می‌دهد، می‌توان از شیب منحنی‌ها برای شناسایی نقطه‌ای که سرعت افزایش هزینه‌ها بیشتر می‌شود استفاده کرد.

برای حد پایین هزینه‌ها:

وابستگی آن‌ها به منابع پردازشی و زیرساخت‌های ابری نسبت داد.

جدول (۱۰). نتایج حاصل از تأثیر افزایش تعداد نوع خدمت بر تابع

تعداد نوع خدمت	هدف	
	حد پایین هزینه‌ها	حد بالا هزینه‌ها
۱	۳۷۸,۸۳۷,۴۴۰	۱,۲۹۷,۶۷۱,۰۰۰
۲	۳۸۷,۶۸۸,۹۰۰	۱,۲۹۸,۱۵۰,۰۰۰
۳	۳۸۸,۳۶۶,۸۰۰	۱,۳۰۱,۹۹۳,۰۰۰
۴	۳۹۰,۶۷۶,۹۰۰	۱,۳۰۹,۱۱۳,۰۰۰
۵	۳۹۱,۰۹۴,۲۰۰	۱,۴۲۹,۵۷۸,۰۰۰
۱۰	۳۹۲,۹۳۰,۱۰۰	۱,۴۵۰,۳۳۸,۰۰۰
۱۵	۳۹۷,۸۴۰,۹۰۰	۱,۴۶۰,۰۸۷,۰۰۰
۲۰	۴۷۸,۷۹۸,۲۰۰	۱,۴۸۲,۸۳۷,۰۰۰
۲۵	۴۸۷,۷۹۰,۶۰۰	۱,۵۱۷,۹۸۴,۰۰۰
۳۰	۴۹۵,۸۶۱,۲۰۰	۱,۵۴۳,۹۴۹,۰۰۰
۳۵	۴۹۸,۲۳۷,۷۰۰	۱,۵۷۵,۹۹۲,۰۰۰
۴۰	۵۰۲,۲۴۹,۴۰۰	۱,۶۰۶,۰۶۵,۰۰۰
۴۵	۵۰۱,۷۲۵,۸۰۰	۱,۶۴۷,۲۸۷,۰۰۰
۵۰	۵۰۳,۷۷۸,۴۰۰	۲,۱۳۰,۶۶۵,۰۰۰

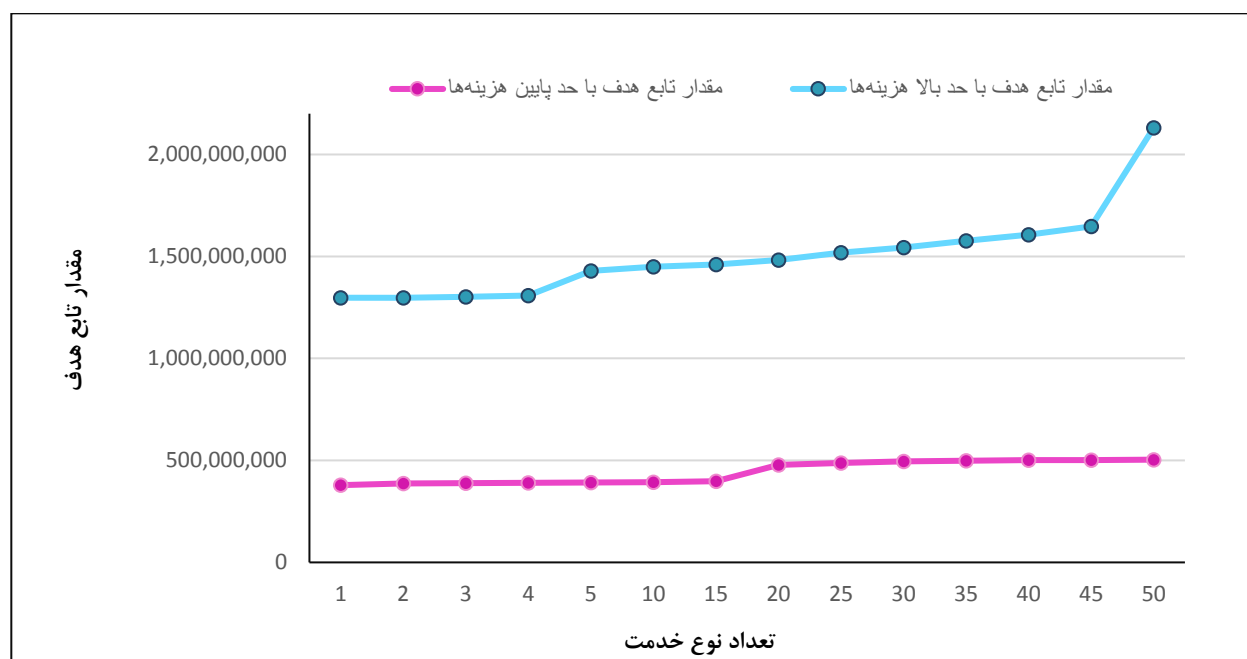
تحلیل داده‌ها نشان می‌دهد که در سناریوی حد پایین هزینه‌ها، مقدار تابع هدف از ۳۷۸,۸۳۷,۴۴۰ (برای یک خدمت) به ۵۰۳,۷۷۸,۴۰۰ (برای ۵۰ خدمت) افزایش یافته است. این افزایش نسبتاً ملایم بوده و نشان می‌دهد که در شرایط حداقل هزینه، سیستم توانسته است تا حدی بهینه‌تر از منابع استفاده کند. در مقابل، در

سناریوی حد بالای هزینه‌ها، مقدار تابع هدف از ۱,۲۹۷,۶۷۱,۰۰۰ به ۲,۱۳۰,۶۶۵,۰۰۰ افزایش یافته است. این افزایش چشم‌گیر بیانگر این است که در شرایطی که هزینه‌ها به سمت بیشینه میل می‌کنند، با افزایش تعداد نوع خدمت، هزینه پردازش و استفاده از زیرساخت‌های ابری به‌صورت قابل توجهی رشد کرده و مدیریت منابع ابری چالش‌برانگیزتر می‌شود.

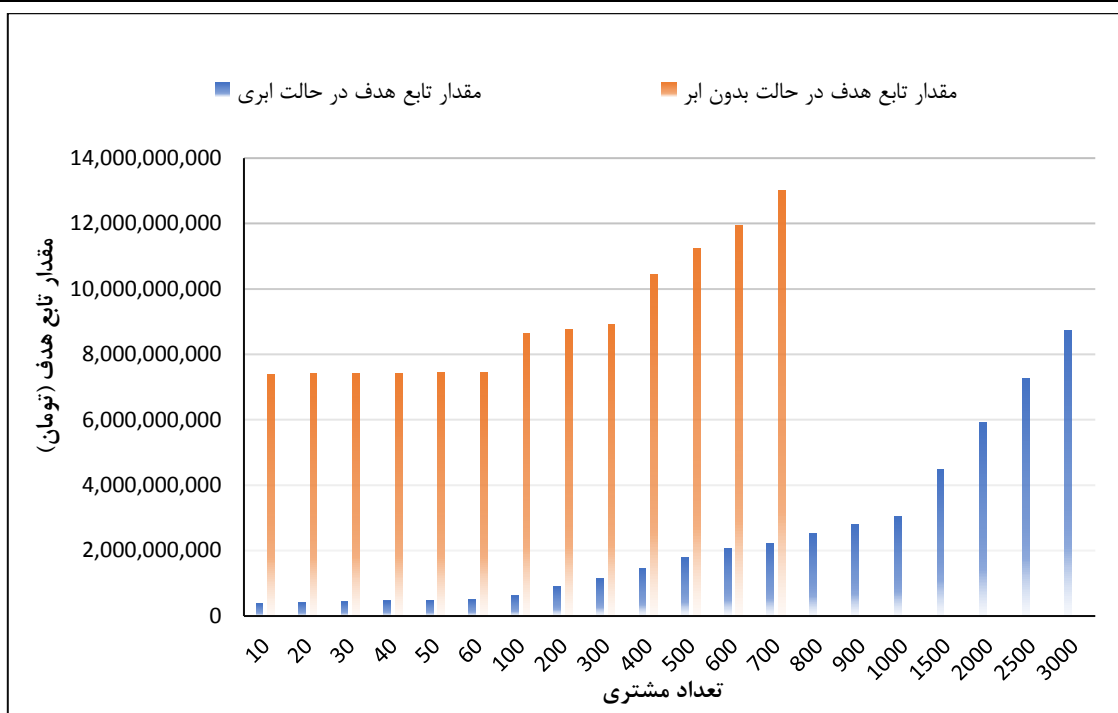
در تحلیل بعدی، تعداد مشتریان به‌تدریج افزایش داده شد و تأثیر آن بر مقدار تابع هدف و زمان حل مدل در دو حالت ابری و بدون ابر بررسی گردید. نتایج نشان داد که در مدل ابری، حتی با افزایش تعداد مشتریان تا ۳۰۰ نفر، فرآیند حل به‌سرعت انجام شد و مقدار تابع هدف روندی صعودی داشت که نشان‌دهنده پایداری و مقیاس‌پذیری بالای مدل ابری در مواجهه با افزایش تقاضا است. این مقیاس‌پذیری، که یکی از ویژگی‌های کلیدی خدمات ابری به‌شمار می‌آید، امکان پاسخ‌گویی به حجم بالای تقاضا را فراهم می‌کند. علاوه بر این، به‌دلیل ساختار پرداخت براساس میزان مصرف در مدل ابری، هزینه‌ها در مقایسه با مدل سنتی بهینه‌تر می‌شود.

ویژگی دیگری که موجب برتری مدل ابری شده، استفاده مشترک از منابع محاسباتی میان کاربران مختلف است که به کاهش هزینه‌های کل سیستم منجر می‌شود. در واقع، استفاده بهینه از منابع زیرساختی در مدل ابری باعث می‌شود که حتی در شرایط افزایش تقاضا، هزینه‌های واحد کاهش یابد و سیستم همچنان مقرون‌به‌صرفه باقی بماند.

برای نمایش بهتر این نتایج، نمودارهایی از روند تغییرات تابع هدف و زمان حل مدل به ازای تعداد مشتریان ارائه می‌شود. این نمودارها به‌صورت بصری اختلاف عملکرد دو مدل را نشان داده و صحت تحلیل حساسیت انجام‌شده را تأیید می‌کنند.



شکل (۳). مقدار تابع هدف براساس تغییرات تعداد نوع خدمت



شکل (۴). مقدار تابع هدف براساس تغییرات تعداد مشتری



شکل (۵). زمان حل براساس تغییرات تعداد مشتری

۴. نتیجه و جمع‌بندی

این تحقیق تلاشی در جهت توسعه زنجیره تأمین و بهره‌گیری از روش‌های نوین با در نظر گرفتن چالش‌ها و مسائل واقعی پیش‌روی صنایع بود. دوم مدل برنامه‌ریزی ریاضی جامع که به‌طور هم‌زمان سه لایه خدمات SaaS، PaaS و IaaS و سه نوع ابر خصوصی، عمومی و ترکیبی را در چارچوب زنجیره تأمین ابری ادغام کرده و همچنین مدل سنتی حلقه‌بسته ارائه شد که با استفاده از نرم‌افزار گمز حل شدند و نتایج به‌دست‌آمده از هر دو مدل با یکدیگر مقایسه گردید. به منظور بررسی

دقیق‌تر و جامع‌تر عملکرد مدل‌ها، تحلیل حساسیت سه پارامتر کلیدی در سناریوهای مختلف انجام شد. این تحلیل‌ها نشان داد که استفاده از فناوری ابری در زنجیره تأمین، می‌تواند موجب کاهش چشم‌گیر هزینه‌ها و بهبود عملکرد سیستم شود.

در حالی که این تحقیق به مقایسه عملکرد مدل‌های ابری و بدون ابر پرداخته است، در تحقیقات آتی می‌توان به تحلیل تأثیر ویژگی‌های زیرساختی (مانند سرعت اینترنت، قابلیت دسترسی و مقیاس‌پذیری) و مسائل امنیتی (مانند حفاظت از داده‌ها و حملات سایبری) بر عملکرد

Chain Inventory Management from the Perspective of "Cloud Supply Chain"—A Data Driven Approach". *Mathematics*, 12(4), p.573.

<https://doi.org/10.3390/math12040573>

- [10] Jede, A. (2023). "Towards Inter-organizational Decision Support in Supply Chains through Cloud-based Discrete Event Simulation: A Conceptual Business Model and Elements of a Research Agenda". *Anwendungen und Konzepte der Wirtschaftsinformatik*, (17), 16-16.
 - [11] Gammelgaard, B., & Nowicka, K. (2024). "Next generation supply chain management: the impact of cloud computing". *Journal of Enterprise Information Management*, 37(4), 1140-1160.
<https://doi.org/10.1108/jeim-09-2022-0317>
 - [12] Liu, S., Han, W., Zhang, Z., & Chan, F. T. (2024). "An analysis of performance, pricing, and coordination in a supply chain with cloud services: The impact of data security". *Computers & Industrial Engineering*, 192, 110237.
<https://doi.org/10.1016/j.cie.2024.110237>
 - [13] Jiang, M., Lin, X., & Ren, H. (2016). "Research on synergetic pricing strategy of cloud-closed loop supply chains". *Adv Model Anal A*, 59, 30-46.
 - [14] Aghamohammadzadeh, E., & Fatahi Valilai, O. (2020). "A novel cloud manufacturing service composition platform enabled by Blockchain technology". *International Journal of Production Research*, 58(17), 5280-5298.
<https://doi.org/10.1080/00207543.2020.1715507>
 - [15] Shahab, E., Kazemisaboor, A., Khaleghparast, S., & Fatahi Valilai, O. (2023). "A production bounce-back approach in the Cloud manufacturing network: case study of COVID-19 pandemic". *International Journal of Management Science and Engineering Management*, 18(4), 305-317.
<https://doi.org/10.1080/17509653.2022.2112781>
 - [16] Aghamohammadzadeh, E., Malek, M., & Valilai, O. F. (2020). "A novel model for optimisation of logistics and manufacturing operation service composition in Cloud manufacturing system focusing on cloud-entropy". *International Journal of Production Research*, 58(7), 1987-2015.
<https://doi.org/10.1080/00207543.2019.1640406>
 - [17] Delaram, J., & Valilai, O. F. (2018). "A mathematical model for task scheduling in cloud manufacturing systems focusing on global logistics". *Procedia manufacturing*, 17, 387-394.
<https://doi.org/10.1016/j.promfg.2018.10.061>
 - [18] Akbaripour, H., Houshmand, M., Van Woensel, T., & Mutlu, N. (2018). "Cloud manufacturing service selection optimization and scheduling with transportation considerations: mixed-integer programming models". *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 95, 43-70.
<https://doi.org/10.1007/s00170-017-1167-3>
 - [19] Shirvani, M. H. (2018, July). "Web service composition in multi-cloud environment: a bi-objective genetic optimization algorithm". In *2018 innovations in intelligent systems and applications (INISTA)* (pp. 1-6). IEEE.
- مدل‌های ابری پرداخت. تفاوت‌های بیشتری علاوه بر هزینه حمل و میزان کربن منتشر شده از جمله ظرفیت وسیله‌ها، زمان‌های حمل، و محدودیت‌های مربوط به نوع کالاها و مقاصد، باید در مدل‌های حمل‌ونقل موردتوجه قرار گیرد. همچنین در ابعاد بزرگ‌تر با توجه به پیچیدگی مسأله، می‌توان از الگوریتم‌هایی نظیر ژنتیک مرتب‌سازی نامغلوب نسخه دوم (NSGA II) استفاده نمود.
- ### مراجع
- [۱] کامکار، الهه و رحمانی، دنیا و روغنیان، عماد، (۱۳۹۸). «ارائه‌ی مدلی برای قیمت‌گذاری کالاهای فاسد شدنی غیرآنی با درنظر گرفتن سن، قیمت و تقاضا به‌عنوان متغیر و رضایت مراکز زنجیره‌تأمین به‌عنوان تابع هدف». نشریه پژوهش‌های مهندسی صنایع در سیستم‌های تولید، ۷(۱۵)، ۳۵۵-۳۷۵.
<https://doi.org/10.22084/ier.2020.20220.1901>
 - [۲] افشارپور، بهنام و جعفری، عزیزاله، (۱۴۰۳). «طراحی شبکه‌ی زنجیره‌تأمین حلقه‌بسته دوکاناله سبز و تاب‌آور تحت ریسک اختلال با درنظر گرفتن انعطاف‌پذیری شبکه». نشریه پژوهش‌های مهندسی صنایع در سیستم‌های تولید، ۱۲(۲۵)، ۹۹-۱۱۹.
<https://doi.org/10.22084/ier.2025.30588.2197>
 - [3] Dehmer, J., & Niemann, J. (2018). "Value chain management through cloud-based platforms". *Procedia-social and behavioral sciences*, 238, 177-181.
<https://doi.org/10.1016/j.sbspro.2018.03.021>
 - [4] Ivanov, D., Dolgui, A., & Sokolov, B. (2022). "Cloud supply chain: Integrating Industry 4.0 and digital platforms in the "Supply Chain-as-a-Service". *Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review*, 160, 102676.
<https://doi.org/10.1016/j.tre.2022.102676>
 - [5] Amini, M., & Jahanbakhsh Javid, N. (2023). "A multi-perspective framework established on diffusion of innovation (DOI) theory and technology, organization and environment (TOE) framework toward supply chain management system based on cloud computing technology for small and medium enterprises". *International Journal of Information Technology and Innovation Adoption*, 11, 1217-1234.
<https://ssrn.com/abstract=4340207>
 - [6] Aich, M., Sengupta, D., & Pasam, V. R. "The Future of Supply Chain Automation: How AI and Cloud Integration Are Transforming Logistics".
<https://doi.org/10.36948/ijfmr.2025.v07i02.38601>
 - [7] Kumari, P., & Singh, S. K. (2025). "Eco-Friendly IoT Networks: Combining Green Cloud Solutions and Design".
 - [8] Stefanovic, N., Radenkovic, M., Bogdanovic, Z., Gaborovic, A. (2025). "Adaptive Cloud-Based Big Data Analytics Model for Sustainable Supply Chain Management". *Sustainability*, 17(1), 354.
<http://dx.doi.org/10.3390/su17010354>
 - [9] Tan, Y., Gu, L., Xu, S. and Li, M., (2024). "Supply

- and data warehousing to optimize supply chain management and retail analytics". In *Applications of Mathematics in Science and Technology* (pp. 810-816).
<https://doi.org/10.1201/9781003606659-156>
- [26] Taghipour, M., Soofi, M. E., Mahboobi, M., & Abdi, J. (2020). "Application of cloud computing in system management in order to control the process". *Management*, 3(3), 34-55.
<http://dx.doi.org/10.31058/j.mana.2020.33003>
- [27] Ageron, B., Bentahar, O., & Gunasekaran, A. (2020). "Digital supply chain: challenges and future directions". In *Supply chain forum: An international journal* (Vol. 21, No. 3, pp. 133-138). *Taylor & Francis*.
<https://doi.org/10.1080/16258312.2020.1816361>
- [28] Lu, X., Xie, Y., Wang, J., & Yao, S. (2020). "Patent labeling and cooperation in a cloud service supply chain". *IEEE Access*, 8, 74326-74338.
<https://doi.org/10.1109/access.2020.2988041>
- [29] Jiang, A. (2023, April). "Design of Supply Chain Intelligent Control System Based on Cloud Computing Virtual Reality Technology. In 2023 4th International Conference on Computer Engineering and Application (ICCEA) " (pp. 452-455). *IEEE*.
<http://dx.doi.org/10.47893/IJSSAN.2023.1227>
- [30] Nahhas, A., Haertel, C., Daase, C., Volk, M., Ramesohl, A., Steigerwald, H., ... & Turowski, K. (2023). "On the integration of google cloud and SAP HANA for adaptive supply chain in retailing". *Procedia Computer Science*, 217: 1857-1866.
<https://doi.org/10.1016/j.procs.2022.12.386>
- <https://doi.org/10.1109/inista.2018.8466267>
- [20] Farzai, S., Shirvani, M. H., & Rabbani, M. (2020). "Multi-objective communication-aware optimization for virtual machine placement in cloud datacenters". *Sustainable Computing: Informatics and Systems*, 28, 100374.
<https://doi.org/10.1016/j.suscom.2020.100374>
- [21] Saeedi, P., & Hosseini Shirvani, M. (2021). "An improved thermodynamic simulated annealing-based approach for resource-skewness-aware and power-efficient virtual machine consolidation in cloud datacenters". *soft computing*, 25, 5233-5260.
<https://doi.org/10.1007/s00500-020-05523-1>
- [۲۲] حاجی‌پور، وحید و رهبرجو، محمد، (۱۳۹۸). «طراحی شبکه زنجیره‌تأمین با بهره‌گیری از فناوری رایانش ابری». پژوهش‌های مهندسی صنایع در سیستم‌های تولید. ۷(۱۴)، ص ۱۲۳-۱۴۱.
<https://doi.org/10.22084/ier.2019.16231.1763>
- [23] Ivanov, D., Dolgui, A., & Sokolov, B. (2022). "Cloud supply chain: Integrating Industry 4.0 and digital platforms in the "Supply Chain-as-a-Service". *Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review*", 160, 102676.
<https://doi.org/10.1016/j.tre.2022.102676>
- [24] Wang, H., Yin, Y. and Wang, X., (2024). "RETRACTED: The design for supply chain management of intelligent logistics system using cloud computing and the internet of things". *Expert Systems*, 41(5), p.e13271.
<https://doi.org/10.1111/exsy.13271>
- [25] Haval, A. M. (2025). "Deploying cloud computing



A Model for Cloud-Based Closed-Loop Supply Chain Network Design

Kimiya Khajeh¹, Emad Roghanian^{2*}

¹. MSc Student of Logistics and Supply Chain, Industrial Engineering Group, Department of Industrial Engineering, K. N. Toosi University of Technology, Tehran, Iran

². Associate Professor, Industrial Engineering Group, Department of Industrial Engineering, K. N. Toosi University of Technology, Tehran, Iran

ARTICLE INFO

Article history:

Received: 2025/06/09

Revised: 2025/09/02

Accepted: 2025/09/10

Keywords:

Cloud Supply Chain
Closed-Loop Supply Chain
Optimization
Cloud Computing.

ABSTRACT

Intense competition in today's market and rapid changes in the business environment have encouraged organizations to adopt modern technologies. In recent years, cloud computing, as an Internet-based approach, has attracted significant attention. In this study, a closed-loop cloud supply chain model is examined as a novel solution for optimizing supply chain performance compared to the traditional model. In the cloud-based model, products are delivered directly from the producer to the customer, eliminating intermediary centers; computational resources are also shared and managed through a pay-per-use structure. Moreover, three service layers-SaaS, PaaS, and IaaS-and three types of cloud-private, public, and hybrid-are simultaneously incorporated, which can be considered another innovation of this research. For modeling, implementation, and solution, the GAMS software is employed. Furthermore, to evaluate model performance under different conditions, sensitivity analysis is conducted regarding the increase in the number of service types, providers, and customers, and the results are compared in both traditional and cloud-based cases. Overall, the findings demonstrate that the adoption of cloud computing technology, due to features such as scalability and pay-per-use, can provide an effective and cost-efficient approach for managing supply chains under high-demand conditions. Thus, the cloud supply chain model not only achieves superior performance in responding to customer needs but also shows significant cost advantages compared to the traditional model.

* Corresponding author. E. Roghanian
Tel.: 021-84063348; E-mail: e_roghanian@kntu.ac.ir