



پژوهش‌های نوین در تصمیم‌گیری

دوره ۶، شماره ۴، زمستان ۱۴۰۰، صص ۱۸۹-۲۱۲

نوع مقاله: پژوهشی

## طراحی مدل چندهدفه فازی برای بهینه‌سازی مکان‌یابی تسهیلات در زنجیره تأمین کالای فاسدشدنی با استفاده از ترکیب دو الگوریتم ابتکاری تجزیه بندرز و آزادسازی لاگرانژ

حمیدرضا محمدی<sup>۱</sup>، رضا احتشام راسی<sup>۲</sup>، علی محتشمی<sup>۳\*</sup>

۱. دانشجوی دکتری، گروه مدیریت صنعتی، واحد قزوین، دانشگاه آزاد اسلامی، قزوین، ایران

۲. استادیار، گروه مدیریت صنعتی، واحد قزوین، دانشگاه آزاد اسلامی، قزوین، ایران

۳. دانشیار، گروه مدیریت صنعتی، واحد قزوین، دانشگاه آزاد اسلامی، قزوین، ایران

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۰/۰۶/۲۲

تاریخ دریافت: ۱۴۰۰/۰۴/۲۴

### چکیده

زنجیره تأمین چهار سطحی مواد غذایی فاسدشدنی به دلیل تغییرات مداوم و قابل توجه در کیفیت محصولات غذایی در سراسر زنجیره تا زمان مصرف نهایی جزء زنجیره‌های تأمین محصولات متفاوت محسوب می‌گردد. هدف از پژوهش حاضر، طراحی مدل چند هدفه فازی برای بهینه‌سازی مکان‌یابی تسهیلات در زنجیره تأمین کالای فاسد شدنی با استفاده از ترکیب دو الگوریتم ابتکاری تجزیه بندرز و آزادسازی لاگرانژ است. این پژوهش از نظر هدف کاربردی و از نظر روش گردآوری اطلاعات میدانی است. در این پژوهش، مدل ریاضی برای مسئله مکان‌یابی تسهیلات در یک زنجیره تأمین چهار سطحی برای محصولات فاسدشدنی با رویکرد بهینه‌سازی هم‌زمان هزینه‌های زنجیره تأمین، زمان تحویل سفارش، انتشار آلاینده‌ها و سطح رضایت مشتریان ارائه می‌گردد. برای سنجش اعتبار پژوهش، مدل ریاضی در صنایع غذایی کاله مورد مطالعه قرار گرفت و مسئله پژوهش در قالب یک مدل چندهدفه برنامه‌ریزی غیرخطی عدد صحیح مختلط ارائه گردید. نتایج الگوریتم پیشنهادی در مطالعه موردی حل و نتایج حاصل از عملکرد الگوریتم بر اساس شاخص‌های استاندارد بررسی و در نهایت، نشانگر کارایی الگوریتم برای طیف وسیعی از مسائل با اندازه‌های متفاوت است.

**کلیدواژه‌ها:** زنجیره تأمین کالای فاسد شدنی، مدل چند هدفه، بهینه‌سازی، مکان‌یابی



## ۱- مقدمه

در جهان امروز یکی از مشکلات اساسی بشر تأمین نیازهای غذایی است، به گونه‌ای که امنیت غذایی و افزایش کیفیت به عنوان اهداف مهم دولت‌ها بوده و در این میان تولید محصولات کشاورزی نیز مورد توجه خاصی قرار گرفته است [۱]. تأمین مواد غذایی سالم و با کیفیت، به خصوص مواردی که شرایط ویژه‌ای دارند، مانند مواد فاسدشدنی، از جمله دغدغه‌های شرکت‌های دست‌اندرکار زنجیره تأمین است [۲]. زنجیره تأمین در خصوص کالاهای با عمر کوتاه و فاسدشدنی همواره یکی از با اهمیت‌ترین و چالش‌برانگیزترین مباحث مدیریتی در زمان‌های مختلف بوده و کالاهای با عمر کوتاه و به خصوص مواد غذایی مواردی هستند که بیشترین چالش‌ها را برای مدیریت زنجیره تأمین به وجود می‌آورند [۳]. این چالش‌ها عمدتاً به علت تنوع در تعداد این قبیل کالاهای، نیازهای خاص برای ردیابی و پیگیری جریان کالا در طی زنجیره تأمین به همراه مکان‌یابی مناسب به منظور کوتاه کردن فاصله‌های دسترسی، عمر کم محصولات و نیاز به کنترل دما در زنجیره تأمین بروز می‌کنند. از سوی دیگر با توجه به هزینه‌های بالای نگهداری کالا و اهمیت بالای سیستم کنترل موجودی در زنجیره تأمین می‌توان از مدیریت موجودی به عنوان یکی از موضوع‌های مهم در صنعت نام برد و برای تضمین عملکرد زنجیره تأمین پایدار، طراحی شبکه باید تاثیرات ناشی از تصمیمات استراتژیک مانند مکان‌یابی تسهیلات و تخصیص ظرفیت، بر پارامترهای اقتصادی، محیطی و اجتماعی را در نظر گیرد. در سال‌های اخیر نظر بسیاری از محققان و صنعتگران به تحقیقات در حوزه زنجیره تأمین جلب شده است [۴]. علاوه بر آن کاهش ضایعات، در هر مرحله از زنجیره مواد غذایی می‌تواند یک گزینه برای بهره‌وری در برابر افزایش تولید باشد.

از آنجا که در زنجیره تأمین کالاهای فاسدشدنی، زمان نقش اساسی دارد و تأخیر به هر دلیلی در هر فرایند از زنجیره، می‌تواند به فساد محصولات و ایجاد ضررهای مالی و زیست‌محیطی منجر شود؛ در این تحقیق سعی گردیده، این شکاف مطالعاتی با در نظر گرفتن اهدافی مانند کاهش هزینه، زمان تدارکات و افزایش رضایت‌مندی مشتری برای برنامه‌ریزی ریاضی فازی با ترکیب چند تأمین‌کننده، چند تولیدکننده، 3PL، دو توزیع‌کننده، دو خرده‌فروش و یک بازار در حالتی که امکان جمع‌آوری، بازیافت محصول و یا انهدام آن وجود دارد، پوشش داده شود. بر این اساس هدف اصلی این پژوهش طراحی مدل ریاضی چند هدفه برای مکان‌یابی تسهیلات در زنجیره تأمین کالای فاسدشدنی با استفاده از ترکیب دو الگوریتم ابتکاری تجزیه بندرز و آزادسازی لاگرانژ است. در زنجیره تأمین پژوهش؛ تولیدکننده، محصولی جدید را عرضه و از



طریق یکی از سه شرکت لجستیک نوع سوم (3PL) به دو توزیع‌کننده ارسال می‌نماید، سپس ۲ خرده فروش کالا را خریده و به مشتریان نهایی می‌فروشند. از آنجا که تقاضای بازار و اطلاعات زنجیره تأمین قطعی نیست، در این پژوهش از اعداد فازی استفاده می‌شود. در پژوهش حاضر، تابع رضایت‌مندی مشتری تابعی است که بر اساس میزان تقاضای برآورده شده و سطح کیفیت (تازگی) محصول سنجیده می‌شود. توجه به اثرات زیست‌محیطی، انتشار گازهای گلخانه‌ای، امکان جمع‌آوری و بازیافت محصول و یا انهدام آن‌ها از دیگر نقاط قوت این پژوهش است. نوآوری این پژوهش در مقایسه با مطالعات گذشته، طراحی یک مدل ریاضی چندهدفه برای بهینه‌سازی اندازه انباشته اقلام قابل استفاده محصولات برگشتی در زنجیره تأمین حلقه بسته چهار سطحی و انعطاف‌پذیری پاسخگویی سیستم برای تأمین سفارشات در شرایط عدم قطعیت مابین مراکز جمع‌آوری ضایعات، بازیافت، تأمین‌کننده و تولیدکننده است. این پژوهش در ۵ بخش شامل؛ بخش اول مقدمه، بخش دوم مبانی نظری و ادبیات، بخش سوم طراحی مدل ریاضی، بخش چهارم یافته‌های پژوهش و بخش پنجم نتایج و پیشنهادهایی برای مطالعات آینده تنظیم شده است.

## ۲- ادبیات پژوهش

مدیریت زنجیره تأمین مجموعه‌ای از روش‌های مورد استفاده برای یکپارچگی مؤثر و کارای تأمین‌کنندگان، تولیدکنندگان، انبارها و فروشندگان به‌گونه‌ای که به‌منظور حداقل کردن هزینه‌های سیستم و تحقق نیازهای خدمات، کالاها به تعداد صحیح در مکان مناسب و در زمان مناسب تولید و توزیع گردند. زنجیره تأمین معمولاً با جریان‌های همگرا و واگرایی از مواد، اطلاعات و پول در یک ساختار شبکه‌ای پیچیده سروکار دارد. این شبکه نیازها و سفارش‌های مصرف‌کننده است که باید به‌طور هم‌زمان برآورده شوند. جلالی فر و همکاران [۵] در پژوهشی نخست عوامل مؤثر در لجستیک معکوس شناسایی و برای طراحی مدل پژوهش چندهدفه به‌دلیل وجود اهداف مختلف، مدل ریاضی آرمانی- فازی با هدف کمینه‌سازی هزینه و مسافت ارائه نمودند. مدل لجستیک حلقه بسته به‌دلیل قرارگیری در گروه مسائل NP-Hard، با روش‌های گرادیان مبنا به راحتی قابل حل نبوده، از این‌رو جهت بهینه‌سازی از الگوریتم مورچگان استفاده شده است. خدادیان و همکاران [۶] یک مدل ریاضی چندهدفه سبز در یک شبکه زنجیره تأمین چند سطحی و چند محصولی ارائه نمودند که به کمینه‌سازی تأثیرات زیست‌محیطی و هزینه‌های کلی زنجیره تأمین و به بیشینه‌سازی سطح رضایت مشتری



پرداختند. از طرف دیگر، به دلیل نامشخص بودن سطح تقاضا در بازار، تقاضا دارای عدم اطمینان و به صورت سناریویی خواهد بود. یک شبکه کارآمد منجر به صرفه‌جویی در هزینه عملیات در سراسر زنجیره می‌شود و به آن کمک می‌کند تا سریع‌تر به نیازهای مشتریان پاسخ دهد [7]. بر طبق نظر سیم چیلوی و کمینسکی<sup>۱</sup> [۸] طراحی شبکه زنجیره تأمین، اساسی‌ترین تصمیم در مدیریت است که بر تمام تصمیمات مربوط به زنجیره تأثیرگذار و گسترده‌ترین اثر را روی بازگشت سرمایه زنجیره و عملکرد کلی آن دارد. طراحی شبکه زنجیره تأمین با تصمیمات استراتژیک زنجیره سروکار دارد. علاوه بر هزینه‌های مکان‌یابی و ظرفیت، باید هزینه‌های حمل‌ونقل و نگهداری موجودی نیز در گام طراحی شبکه در نظر گرفته شوند. نادیده گرفتن هزینه‌های عملیاتی در این گام منجر به بهیمنی بخشی از ساختار شبکه می‌گردد. خدایپرستی و همکاران<sup>۲</sup> [۹] یک مسئله مکان‌یابی-تخصیص چند دوره‌ای برای برنامه‌ریزی شبکه زنجیره تأمین معکوس معرفی نمودند. این پژوهش مدل تخصیص اصلاح شده‌ای برای جلوگیری از نقص ناخواسته معیارها ارائه می‌دهد. دای و همکاران<sup>۳</sup> [۱۰] یک مسئله موجودی-مکان‌یابی شبکه زنجیره تأمین را برای محصولات فاسدشدنی با ظرفیت فازی و محدودیت انتشار کربن ادغام و با مدل بهینه‌سازی بهبود داده‌اند. این مدل یک برنامه‌ریزی غیرخطی عدد صحیح مختلط را فرموله کرده و برای حل آن از الگوریتم ژنتیک ترکیبی و تحقیق هارمونی ترکیبی به منظور کمینه کردن کل هزینه بهره برده‌اند. رفیعی مجید و همکاران [۱۱] یک زنجیره تأمین سه لایه شامل تأمین‌کننده، تعدادی مراکز توزیع و تعدادی خرده فروش (مشتری) را به صورت مسئله موجودی-مکان‌یابی-مسیریابی ارائه داده‌اند که در آن محصولات به مشتری‌ها در یک افق زمانی محدود ارسال می‌شود. در این پژوهش تلاش می‌شود تا با طراحی یک مدل ریاضی چند هدفه در شرایط عدم قطعیت که می‌تواند به‌طور هم‌زمان فعالیت‌های بازیابی محصول، شامل گزینه‌های تولید دوباره و گزینه دفن ضایعات را در برگیرد، ایجاد کنیم. در این پژوهش، یک مدل ریاضی عدد صحیح مختلط شامل مراکز تولید، توزیع و مشتریان در حالت پیشرو و مراکز جمع‌آوری، مراکز بازیابی، تولید دوباره و دفع ضایعات در زنجیره تأمین چهار سطحی ارائه و در نهایت به صرفه‌جویی در هزینه و کاهش آلودگی‌های زیست‌محیطی منجر می‌گردد. همچنین در مدل پیشنهادی پژوهش، گزینه دفع ضایعات به‌عنوان یکی از فعالیت‌های بازیابی محصول در نظر گرفته و بنابراین یک وضعیت واقعی از زنجیره تأمین چهار سطحی حلقه بسته به‌منظور بهینه‌سازی مکان‌یابی تسهیلات نشان داده می‌شود.



### ۳- روش پژوهش

این پژوهش از نظر هدف کاربردی و روش گردآوری اطلاعات میدانی است. در گردآوری اطلاعات مربوط به ادبیات و پیشینه تحقیق از روش کتابخانه‌ای و در گردآوری اطلاعات برای حل مدل از روش میدانی استفاده می‌گردد. در این پژوهش با استفاده از مدل‌سازی برنامه‌ریزی ریاضی براساس متغیرهای عدم قطعیت، سعی در ارائه مدل نزدیک به جهان واقعی داریم. با در نظر گرفتن مراحل علم تحقیق در عملیات، بعد از جمع‌آوری داده‌ها اقدام به طراحی مدل زنجیره تأمین کالای فاسدشدنی و سپس بهینه‌سازی آن نمودیم. در نهایت مدل طراحی شده، با توجه به ماهیت مدل، با استفاده از نرم‌افزار متلب و روش ابتکاری تجزیه بندرز و ضریب آزادسازی لاگرانژ، به‌طوری که تا حد امکان، محدودیت‌های مسئله مدنظر قرار گرفته و اهداف مورد نظر مدیران صنعت کالای فاسدشدنی تأمین گردد، حل گردید. شبکه زنجیره تأمین در این پژوهش یک شبکه لجستیک چند محصولی، چندسطحی و چنددوره‌ای است که شامل بخش‌های تولید، بازرسی، توزیع، مشتری، بازیافت و دورریز است. در این پژوهش به دنبال تعیین ساختار بهینه شبکه این زنجیره در جهت کاهش هزینه کل و کاهش اثرات زیست‌محیطی کل مجموعه هستیم که هزینه کل زنجیره، مجموع هزینه‌های سرمایه‌گذاری جاری برای باز کردن مکان‌های تولید/بازیافت، بازرسی/توزیع، هزینه‌های تولید و پردازش، دورریز، حمل‌ونقل و هزینه‌های جریمه ناشی از به کار نبردن کل ظرفیت تولیدی و یا عرضه می‌باشد. در ذیل به مراحل انجام تحقیق ارائه خواهند گردید:

#### اندیس‌ها و پارامترها:

با توجه به عدم در دسترس بودن داده‌های واقعی، داده‌های ورودی برای هر یک از پارامترها براساس تابع توزیع تصادفی که در جدول (۱) نشان داده شده‌اند، براساس توابع توضیح مختلف قابل مشاهده می‌باشند.

جدول ۱. توابع توزیع تولید پارامترهای مسئله تحقیق

ردیف	نماد	پارامتر	تابع توزیع
۱	$\tilde{\theta}_h^p$	تقاضای مشتری $l$ برای محصول $p$ در دوره زمانی $t$	$U(50,100)$
۲	$\omega_{\eta t}$	مصرف مواد اولیه $A$ در تولید محصول $p$ در دوره زمانی $t$	$U(50,100)$
۳	$\phi_{pgt}$	گروه محصولات $g$ از محصول $p$ در دوره زمانی $t$	$U(50,100)$
۴	$\tilde{S}_{i\tau}^{at}$	حداکثر ظرفیت تأمین، تأمین‌کننده $i$ با سطح ظرفیت $l$ برای	$U(50,100)$



ردیف	نماد	پارامتر	تابع توزیع
		مواد اولیه $\bar{a}$ در دوره زمانی $t$	
۵	$\tilde{M}_{jp}^{bt}$	حداکثر ظرفیت تولید، تولیدکننده $j$ با سطح ظرفیت $b$ برای محصول $p$ در دوره زمانی $t$	$U(50,100)$
۶	$\tilde{D}_{kg}^{ct}$	حداکثر ظرفیت توزیع، توزیع کننده $k$ با سطح ظرفیت $c$ برای گروه محصولات $g$ در دوره زمانی $t$	$U(50,100)$
۷	$\hat{A}_{it}$	حداقل تعداد تأمین کننده $i$ انتخابی در دوره زمانی $t$	$U(50,100)$
۸	$\hat{B}_{jt}$	حداقل تعداد تولیدکننده $j$ انتخابی در دوره زمانی $t$	$U(50,100)$
۹	$\hat{C}_{kt}$	حداقل تعداد توزیع کننده $k$ انتخابی در دوره زمانی $t$	$U(50,100)$
۱۰	$\tilde{F}_{ij}$	فاصله مکانی بین تأمین کننده $i$ تا تولیدکننده $j$	$U(250,400)$
۱۱	$\tilde{W}_{jk}$	فاصله مکانی بین تولیدکننده $j$ تا توزیع کننده $k$	$U(250,400)$
۱۲	$\tilde{H}_{kl}$	فاصله مکانی بین توزیع کننده $k$ تا مشتری $l$	$U(250,400)$
۱۳	$\sigma_{\tau}$	واحد مواد اولیه $\bar{a}$	$U(5,25)$
۱۴	$V_p$	واحد محصول $p$	$U(5,25)$
۱۵	$E_{it}^a$	هزینه ثابت و عملیاتی انتخاب تأمین کننده $i$ با سطح ظرفیت $a$ در دوره زمانی $t$	$U(2000,10000)$
۱۶	$Q_{jt}^b$	هزینه ثابت و عملیاتی احداث تولیدکننده $j$ با سطح ظرفیت $b$ در دوره زمانی $t$	$U(2000,10000)$
۱۷	$N_{kt}^c$	هزینه ثابت و عملیاتی احداث توزیع کننده $k$ با سطح ظرفیت $c$ در دوره زمانی $t$	$U(2000,10000)$
۱۸	$R_m$	هزینه هر واحد حمل و نقل مواد اولیه براساس مسافت بین سطوح با توجه به نوع وسیله حمل $m$	$U(2000,10000)$
۱۹	$U_m$	هزینه هر واحد حمل و نقل محصول براساس مسافت بین سطوح با توجه به نوع وسیله حمل $m$	$U(350,750)$
۲۰	$\in_{it}^a$	هزینه انتشار گازهای گلخانه‌ای انتخاب تأمین کننده $i$ با سطح ظرفیت $a$ در دوره زمانی $t$	$U(100,500)$



ردیف	نماد	پارامتر	تابع توزیع
۲۱	$\eta_{jt}^b$	هزینه انتشار گازهای گلخانه‌ای احداث تولیدکننده $j$ با سطح ظرفیت $b$ در دوره زمانی $t$	$U(100,500)$
۲۲	$v_{kt}^c$	هزینه انتشار گازهای گلخانه‌ای احداث توزیع کننده $k$ با سطح ظرفیت $c$ در دوره زمانی $t$	$U(100,500)$
۲۳	$\tilde{\lambda}_m$	ضریب انتشار گازهای گلخانه‌ای هر واحد حمل‌ونقل مواد اولیه براساس مسافت بین سطوح با توجه به نوع وسیله حمل $m$	$U(0,1)$
۲۴	$\tilde{\mu}_m$	ضریب انتشار گازهای گلخانه‌ای هر واحد حمل‌ونقل محصول براساس مسافت بین سطوح با توجه به نوع وسیله حمل $m$	$U(0,1)$

در ادامه جداول (۱) و (۲) مقادیر داده‌های ورودی که در حل مدل ریاضی طراحی شده به جهت بهینه‌سازی به کار می‌روند.

جدول ۲. تعداد مجموعه‌های درگیر در مسئله تحقیق

ردیف	عنوان	مقدار
۱	مجموعه‌هایی از تأمین‌کنندگان	۵
۲	مجموعه‌هایی از مراکز تولید	۵
۳	مجموعه‌هایی از مراکز توزیع	۴
۴	مجموعه‌هایی از مشتریان	۳
۵	مجموعه‌هایی از محصولات	۴
۶	مجموعه‌هایی از مواد اولیه	۴
۷	مجموعه‌هایی از وسایل (امکانات) حمل‌ونقل	۹
۸	دوره زمانی	۱۲
۹	گروه محصولات	۵
۱۰	سطح ظرفیت $a$ تأمین‌کننده	۰/۵
۱۱	سطح ظرفیت $b$ تولیدکننده	۰/۶۵
۱۲	سطح ظرفیت $c$ توزیع‌کننده	۰/۴۷

### ۳-۱- مفروضات مدل ریاضی پژوهش

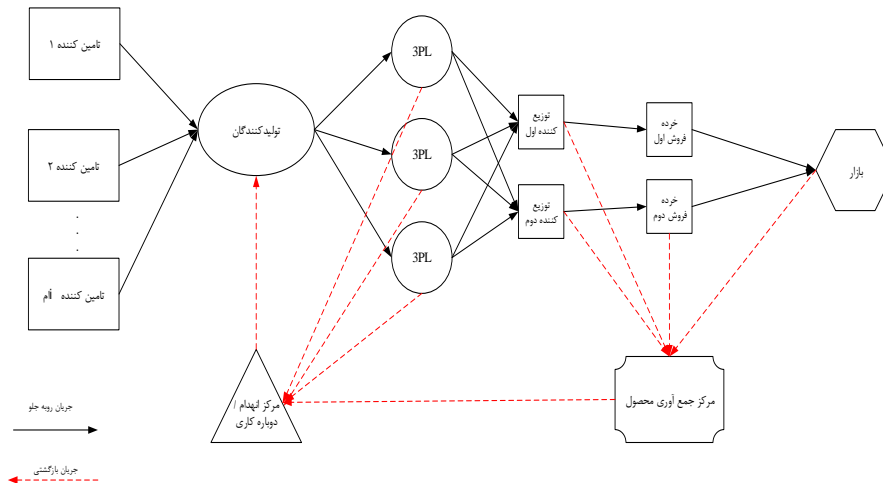
مجموعه‌ای از وسایل نقلیه مشابه برای حمل محصولات از عرضه‌کننده به خرده‌فروش استفاده می‌شود.



دوره زمانی، یک روزه (سه شیفت در یک روز) در نظر گرفته می‌شود. ظرفیت تولیدکنندگان و مراکز توزیع محدود است. مراکز توزیع، تقاضای خرده فروشان را برآورده می‌کنند. خرده‌فروشان و مراکز توزیع می‌توانند بیش از سفارشات، سفارش دهند (ذخیره‌سازی). چند نوع محصول در نظر گرفته شده است. زمان و هزینه ارسال وسیله مشخص است. هزینه سفر و مسافت واحد مشخص است. برای هزینه حمل‌ونقل درون شبکه‌ای باید هزینه ثابت (FCT) تجهیزات در نظر گرفته شود. مدل زنجیره تأمین از نوع کششی است. افق برنامه‌ریزی از نوع کششی است.

### ۲-۳- مدل‌سازی ریاضی

زنجیره تأمینی مانند شکل (۱) را در نظر بگیرید که شبکه زنجیره تأمین مورد مطالعه می‌باشد، زنجیره تأمین چهار سطحی شامل چند تأمین‌کننده ( $I$ )، چند تولیدکننده ( $J$ )، چند توزیع‌کننده ( $K$ ) و مشتریان ( $L$ ) است که در این پژوهش به دنبال مکان‌یابی صحیح به منظور بهینه‌سازی هزینه و زمان تدارک در راستای رضایت‌مندی مشتریان می‌باشیم.



شکل ۱. شبکه توزیع در زنجیره تأمین پژوهش





برای مسئله پژوهش چهار هدف در نظر گرفته شده است: کمینه کردن هزینه، آلودگی‌های زیست‌محیطی و زمان تدارک و بیشینه کردن رضایت مشتری. برای کمینه کردن هزینه اجزای مختلفی در تحقیقات مختلف در نظر گرفته شده است. هزینه‌های مسئله شامل هزینه احداث مکان تولید [۱۱]، مکان توزیع [۱۲]، مکان خرده‌فروشی [11]، هزینه حمل‌ونقل [۱۳] و [۱۴] و [۱۵] و [۱۶]، هزینه مواد اولیه [۱۶] و [۱۴]، هزینه سفارش‌دهی [۱۴]، هزینه تولید [۱۳] و [۱۶] و [۱۴] و [۱۵] و [۱۷] و [۱۸] و [۱۹]، جریمه دیرکرد [۱۸]، هزینه سفارش از دست رفته [۱۸]، هزینه نگهداری موجودی [۱۲] و [۱۳] و [۱۶]، هزینه کالای مرجوعی [۱۷] و [۱۸]، هزینه حمل مرجوعی [۱۹] و [۲۰]، هزینه‌های زیست‌محیطی [۲۱] است.

### ۳-۳- مدل ریاضی پژوهش

$$\begin{aligned} \text{Min } F_{Eco} = & \sum_i \sum_a \sum_t E_{it}^a \cdot \alpha_{it}^a + \sum_j \sum_b \sum_t Q_{jt}^b \cdot \beta_{jt}^b + \sum_k \sum_c \sum_t N_{kt}^c \cdot \gamma_{kt}^c \\ & + \sum_i \sum_j \sum_\tau \sum_t \sum_m \tilde{F}_{ijt} \cdot R_m \cdot \sigma_\tau \cdot \tilde{X}_{ij}^{am} + \sum_j \sum_k \sum_p \sum_t \sum_m G_{jkt} \cdot U_m \cdot V_p \cdot \tilde{Y}_{jk}^{ptm} \\ & + \sum_k \sum_l \sum_p \sum_t \sum_m \tilde{H}_{kl} \cdot U_m \cdot V_p \cdot \tilde{Z}_{kl}^{ptm} \end{aligned} \quad (1)$$

$$\begin{aligned} \text{Min } F_{Env} = & \sum_i \sum_a \sum_t \epsilon_{it}^a \cdot \alpha_{it}^a + \sum_j \sum_b \sum_t \eta_{jt}^b \cdot \beta_{jt}^b + \sum_k \sum_c \sum_t v_{kt}^c \cdot \gamma_{kt}^c \\ & + \sum_i \sum_j \sum_\tau \sum_t \sum_m \tilde{F}_{ijt} \cdot \lambda_m \cdot \sigma_\tau \cdot \tilde{X}_{ij}^{am} + \sum_j \sum_k \sum_p \sum_t \sum_m G_{jkt} \cdot \mu_m \cdot V_p \cdot \tilde{Y}_{jk}^{ptm} \\ & + \sum_k \sum_l \sum_p \sum_t \sum_m \tilde{H}_{kl} \cdot \mu_m \cdot V_p \cdot \tilde{Z}_{kl}^{ptm} \end{aligned} \quad (2)$$

$$\text{Min } F_{delivery-time} = \sum_i \sum_m \sum_j \sum_k \sum_t \left( \frac{\tilde{\theta}_t^p}{R_m + U_m} \right) \tilde{Y}_{jk}^{ptm} \quad (3)$$

$$\text{Min } F_{Backorder-level} = \sum_t \text{Max} \sum_p \sum_k \tilde{Z}_{kl}^{ptm} \quad (4)$$

تابع هدف اول، کمینه کردن هزینه‌ها را بر عهده دارد که شامل: بخش اول، هزینه ثابت و عملیاتی انتخاب تأمین‌کننده؛ بخش دوم، هزینه ثابت و عملیاتی احداث تولیدکننده؛ بخش سوم، هزینه ثابت



و عملیاتی احداث توزیع‌کننده؛ بخش چهارم، هزینه حمل‌ونقل مواد اولیه بر اساس مسافت؛ بخش پنجم، هزینه انتقال محصول از تولیدکننده به توزیع‌کننده، بخش ششم، هزینه انتقال هر واحد محصول از توزیع‌کننده به مشتری می‌شود. تابع هدف دوم، کمینه کردن آلودگی‌های زیست-محیطی را به عهده دارد؛ در بخش اول این تابع هزینه انتشار گازهای گلخانه‌ای انتخاب تأمین-کننده، بخش دوم هزینه انتشار گازهای گلخانه‌ای احداث تولیدکننده، بخش سوم هزینه انتشار گازهای گلخانه‌ای احداث توزیع‌کننده، بخش چهارم هزینه انتشار گازهای گلخانه‌ای ایجاد شده به دلیل حمل مواد اولیه از تأمین‌کننده به تولیدکننده، بخش پنجم هزینه انتشار گازهای گلخانه‌ای ایجاد شده به دلیل حمل محصول از تولیدکننده به توزیع‌کننده، بخش ششم هزینه انتشار گازهای گلخانه‌ای ایجاد شده به دلیل حمل محصول از توزیع‌کننده به مشتری است. تابع هدف سوم و چهارم توابع رضایت‌مندی مشتری به وسیله کمینه کردن زمان ارسال و سطح فروش از دست رفته است.

#### محدودیت‌ها

$$\sum_j \tilde{X}_{ij}^a \leq \sum_a \tilde{S}_{i\tau}^{at} \cdot \alpha_{it}^a \quad \forall i, \tau, t \quad (5)$$

$$\sum_k \tilde{Y}_{jk}^{pt} \leq \sum_b \tilde{M}_{jp}^{bt} \cdot \beta_{jt}^b \quad \forall j, p, t \quad (6)$$

$$\sum_l \sum_p V_p \tilde{Z}_{kl}^{pt} \cdot \phi_{pgt} \leq \sum_c \tilde{D}_{kg}^{ct} \cdot \gamma_{kt}^c \quad \forall k, g, t \quad (7)$$

$$\sum_j X_{ij}^\tau \geq \sum_k \sum_p \tilde{Y}_{jk}^p \omega_{\tau pt} \quad \forall j, \tau, t \quad (8)$$

$$\sum_j \tilde{Y}_{jk}^{pt} \geq \sum_l \tilde{Z}_{kl}^{pt} \cdot \alpha_{it}^a \quad \forall k, p, t \quad (9)$$

$$\sum_k \tilde{Z}_{kl}^{pt} \geq \tilde{\theta}_{lt}^p \quad \forall l, p, t \quad (10)$$

$$\sum_a \alpha_{it}^a \leq 1 \quad \forall i, t \quad (11)$$

$$\sum_b \beta_{jt}^b \leq 1 \quad \forall j, t \quad (12)$$

$$\sum_c \gamma_{kt}^c \leq 1 \quad \forall k, t \quad (13)$$

$$\sum_i \sum_a \sum_t \alpha_{it}^a \leq \hat{A}_{it} \quad (14)$$



$$\sum_j \sum_b \sum_t \beta_{jt}^b \leq \hat{B}_{jt} \quad (۱۵)$$

$$\sum_k \sum_c \sum_t \gamma_{kt}^c \leq \hat{C}_{kt} \quad (۱۶)$$

$$\tilde{X}_{ij}^a, \tilde{Y}_{jk}^{pt}, \tilde{Z}_{kl}^{pt} \geq 0 \quad (۱۷)$$

$$\alpha_{it}^a, \beta_{jt}^b, \gamma_{kt}^c = 0, 1 \quad (۱۸)$$

محدودیت (۵) تضمین می‌کند که مقدار ماده اولیه انتقال داده شده از تأمین‌کننده به تولیدکننده از حداکثر ظرفیت تأمین تأمین‌کننده بیشتر نشود. محدودیت (۶) نشان می‌دهد که مقدار محصول منتقل شده از تولیدکننده به توزیع‌کننده نباید از حداکثر ظرفیت تولید تولیدکننده بیشتر شود. محدودیت (۷) بیانگر این مطلب است که حداکثر ظرفیت توزیع، توزیع‌کننده  $k$  با سطح ظرفیت  $c$  برای گروه محصولات  $g$  در دوره زمانی  $t$  نباید بیشتر از سطح ظرفیت تعریف شده باشد. محدودیت (۸) نشان می‌دهد که مقدار ماده اولیه منتقل شده از تأمین‌کننده به تولیدکننده، باید حداقل برابر مقدار ماده اولیه مورد نیاز برای تولید کل محصولات برنامه‌ریزی شده شود تا دچار کمبود ماده اولیه مورد نیاز نشویم. بر اساس محدودیت (۹)، مقدار محصول منتقل شده از تولیدکننده به توزیع‌کننده باید حداقل برابر مقدار محصول منتقل شده از توزیع‌کننده به مشتری باشد تا دچار کمبود نشویم. محدودیت (۱۰) تضمین می‌کند که مقدار محصول منتقل شده از توزیع‌کننده به مشتری حداقل برابر تقاضای مشتری باشد. بدین ترتیب، از فروش از دست رفته جلوگیری خواهد شد. محدودیت (۱۱) نشان می‌دهد که در هر دوره زمانی حداکثر یک تأمین‌کننده انتخاب شود. محدودیت (۱۲) نیز تعداد تولیدکنندگان را در هر زمان حداکثر برابر یک نگه می‌دارد. محدودیت (۱۳) نیز تعداد توزیع‌کنندگان را در هر دوره حداکثر برابر ۱ در نظر می‌گیرد. محدودیت‌ها (۱۴) الی (۱۶) نشان می‌دهد که حداقل تعداد تأمین‌کنندگان باید برابر تأمین‌کنندگان انتخابی باشد. محدودیت‌های (۱۷) و (۱۸) نیز که محدودیت‌های منطقی مسئله هستند. مدل ارائه شده یک مدل برنامه‌ریزی غیرخطی عدد صحیح مختلط است که مسئله به دلیل پیچیدگی بالا جزء مسائل دسته NP-Hard طبقه‌بندی می‌شود. روش تجزیه بندرز مدل را به دو مسئله اصلی و زیرمسئله تقسیم و ضریب آزادسازی لاگرانژ با آزادسازی همه یا برخی قیود مسئله ضمن فراهم نمودن اطلاعاتی از جواب بهینه مسئله اصلی، جواب‌های تقریبی قابل قبولی را برای مسئله اصلی ایجاد می‌کند، لذا با تلفیق این دو ویژگی سعی در ارائه روشی



کارآمد برای حل مدل ریاضی مسئله تحقیق در راستای دستیابی به جواب بهینه قابل قبول گامی مؤثر برداشته شود. در ادامه در قالب شبه کد تلفیق این دو ابزار نشان داده شده است. برای اعتبارسنجی مدل، در ابعاد کوچک از روش محدودیت اِپسیلون در محیط نرم‌افزاری گمز با حل کننده Cplex حل شده است

### جدول ۳. شبه‌کد تلفیق روش تجزیه بندرز و ضریب لاگرانژ

Algorithm Benders Decomposition with Lagrangian Relaxation	
1.	Step (0). Initialize $\hat{\eta}_{t+1} = 0$
2.	While Stopping criteria not satisfied do
3.	Forward Pass
4.	For $t = 1, \dots, T$ do
5.	Step (1). Solve the t-stage (global) optimization problem ( $\hat{M}_t$ )
6.	end for
7.	Step (2). Update lower bound
8.	Backward Pass
9.	For $t = T, T - 1, \dots, 2$ do
10.	Step (3). With the stored $X_{tT}$ values from the forward pass, solve the t-stage Lagrangian problem
11.	$\mathcal{L}_t$ For (near) optimal Lagrangian multipliers.
12.	Step (4). Calculate a new Benders optimality cut for stage t using the Lagrange multipliers
13.	and objective function value obtained from Step (3).
14.	end for
15.	Step (5). Solve the first-stage problem $\hat{M}_1$
16.	Step (6). Calculate upper bound
17.	Step (7). Increment the iteration count
18.	end while
19.	Step (8). Exit

### ۳-۴- تحلیل حساسیت

برای تحلیل حساسیت مسئله با ۱۵ نود و ۳ محصول و ۶ وسیله نقلیه برای ارسال سفارشات در نظر گرفته شده است. برای تحلیل حساسیت مسئله ۴ پارامتر در مسئله در نظر گرفته که پارامتر اول مقدار هزینه و دوم زمان ارسال سفارشات، میزان انتشار گازهای گلخانه و سطح رضایت‌مندی مشتریان است. با افزایش ظرفیت تولید و ارسال، هزینه کل کاهش و از طرف دیگر قابلیت اطمینان سیستم تغییر محسوس نمی‌کند. دلیل این امر آن است که افزایش ظرفیت،



فضای مسئله را افزایش و گزینه‌های جابه‌جایی مختلف بیشتر شود. از سوی دیگر، قابلیت اطمینان تأسیس مراکز تأمین ارتباطی به ظرفیت ناوگان توزیع ندارد. با افزایش بودجه، تأسیس مراکز توزیع و هزینه کل افزایش می‌یابد، می‌توان مراکز توزیع با قابلیت اطمینان بیشتر را انتخاب و در نتیجه قابلیت اطمینان افزایش پیدا می‌کند و در نهایت اهدافی همچون هزینه، میزان انتشار گازهای گلخانه‌ای، زمان ارسال سفارشات و در نهایت سطح رضایت‌مندی مشتریان بهینه خواهد گشت.

#### ۴- یافته‌های پژوهش

مدل ارائه شده مسئله غیرخطی مختلط عدد صحیح چند هدفه تحت عدم قطعیت است. براساس نظر بریج ابتدا متغیرهای باینری تصمیم‌گیری برای پیکره‌بندی زنجیره تأمین مشخص می‌شوند و سپس متغیرهای صحیح و پیوسته مربوط به حجم محصولات و جابه‌جایی‌ها نشان داده می‌شود. اولین بهینه‌سازی  $P1$  برای نشان دادن اهداف چندگانه از روش هیبریدی تجزیه بندرز و ضریب آزادسازی لاگرانژ و در دومین مرحله بهینه‌سازی  $P2$  عملکرد مورد انتظار برای هر حل (امیدریاضی CSL) محاسبه می‌شود. تمام نتایجی که در ادامه می‌آید، بر اساس جداول داده‌های مورد مطالعاتی است و میزان وزن نسبی پایداری جواب ( $\omega$ ) برابر  $1/5$  و وزن نسبی پایداری مدل ( $\omega$ ) برابر  $5000$  فرض شده‌اند. جداول (۴) تا (۶) کلی نسبت به نتیجه برنامه‌ریزی کلی زنجیره تأمین، شامل نحوه انتخاب تأمین‌کنندگان و پاسخگویی به تقاضا ارائه می‌دهد. در جدول (۴) خانه‌های خالی جدول معادل صفر است و به این معنی است که محصولات نهائی در همان دوره سفارش‌دهی به مشتریان تحویل نگردیده است.

جدول ۴. برنامه‌ریزی زنجیره حاصل از حل مدل پیشنهادی

دوره												مجموع کلواکه	کارخانه	مجموع
۱۲	۱۱	۱۰	۹	۸	۷	۶	۵	۴	۳	۲	۱			
									۳۰۸	۲۵۹	۱۹/۵	۱	۱	۱
					۲۰۰	۴۲۵	۳۳۰	۶۵۳	۷۵۰	۸۲۱	۲۰۵	۱	۲	
					۲۶۳	۳۲۰	۱۲۰	۵۹۰	۴۹۶		۲۳۲	۱	۳	
		۹۰/۳		۵۴۸	۲۰۰	۲۲۳		۹۹۴	۶۵۶	۱۱۳۷	۹۰۵	۱	۱	۲
				۹۲۰	۸۶۰	۵۴۰	۶۸۰	۵۶۱	۲۱۲	۱۹۴	۴۵۸	۱	۲	



دوره												خانواده محصول	کارخانه	محصول
۱۲	۱۱	۱۰	۹	۸	۷	۶	۵	۴	۳	۲	۱			
		۵۶۰	۶۷۰	۹۳۶		۳۰۷	۵۷۰	۴۰				۱	۳	
	۴۰۰	۳۲۷	۵۳۰	۱۰۰	۱۰۰	۱۲۰			۲۴۹	۲۳۵	۲۹۵	۱	۱	۳
	۵۵۰	۵۹۳	۶۲۰	۳۰۰		۹۰	۱۶۰	۸۳۰	۷۶۸	۹۷۰	۲۰۰	۱	۲	
							۲۵۰	۷۸۰	۱۰۲		۳۹/۶	۱	۳	
				۳۵۳	۲۳۷	۱۳۰		۴۰۷	۷۲۹	۲۸۳	۴۸۲	۱	۱	۴
				۸۳۳	۳۸۷	۴۳۷	۲۸۰	۹۳۰	۶۲۶	۶۵۵	۵۱۶	۱	۲	
				۱۰۵			۲۰۰	۲۲۶				۱	۳	
		۳۷۰	۳۵۳	۱۸۳	۴۸۳	۷۵۳	۹۹۱	۱۰۴۷	۷۱۷	۱۰۹۰	۷۴۲	۱	۱	۵
				۳۷۷			۱۷۰		۲۳۰			۳		
				۶۶/۵	۳۲۰	۱۶۴	۳۶۷	۷۳/۴		۵/۸	۳۹۹	۱	۲	
						۱۷۰	۲۸۰					۳		
				۳۴۹	۲۰		۲۷۷	۵۹۸	۳۳	۱۵۰	۱۷۰	۱	۳	

جدول ۵. برنامه ریزی حمل و نقل به دست آمده از حل مدل پیشنهادی

دوره t												کارخانه	مصرف مواد اولیه	حمل و نقل
۱۲	۱۱	۱۰	۹	۸	۷	۶	۵	۴	۳	۲	۱			
									۱	۲	۶	۱	۱	حمل و نقل
								۲	۵	۵	۵	۲		
								۳	۸	۸	۸	۳		
					۱	۱	۱	۱	۱	۴	۶	۱	۲	
												۲		
۴	۴	۵	۷	۷	۱۰	۱۰	۱۰	۱۰	۱۰	۱۷	۲۲	۳		
۸	۸	۸	۸	۸	۸	۸	۸	۸۸	۸	۸	۱۵	۲	۳	
											۵	۳		
										۲	۳	۱	۴	
۳	۳	۳	۳	۴	۴	۴	۴	۶	۹	۹	۷	۶	۱	۵
								۱	۱	۴		۱	۱	مشتری
							۲	۳				۲		
							۳	۵				۳		



دوره t												کارخانه	مصرف مواد اولیه	
۱۲	۱۱	۱۰	۹	۸	۷	۶	۵	۴	۳	۲	۱			
				۱					۳	۲		۱	۲	
				۲				۲	۶			۲		
	۱	۲		۳					۷	۵		۳		
											۶	۱	۳	
										۷		۲		
										۵	۱۵	۳		
									۳		۶	۱	۴	
										۲	۳	۲		
			۱			۲	۳					۱	۵	
											۱۰	۲		
									۲	۱		۱	۴→۵	

جدول (۵) تعاملات بین موجودیت‌های زنجیره تأمین (جابه‌جایی توسط سیستم حمل‌ونقل در بین سطوح زنجیره) را نشان می‌دهد. با این وجود در چند مورد استثنایی کمبودهایی رخ می‌دهد و صرفه جویی در سایر هزینه‌ها نتوانسته هزینه‌های قطع ارتباط بین تأمین‌کنندگان و نقاط تقاضا را جبران نماید.

جدول ۶. تعاملات بین موجودیت‌های زنجیره تأمین

متوسط تعداد محصولی که نقطه مشتری دریافت می‌کند	تعداد دوره‌هایی که نقطه مشتری محصول دریافت می‌کند	نقطه مشتری	سایت ز	متوسط مصرف مواد اولیه	تعداد مکان‌های احداث	کارخانه	مراکز جمع‌آوری
۱۸۸/۷	۸	۱	۱	۱۸۴۸/۶	۱۱	۱	۱
۰	۰		۲	۵۰۹/۷	۴	۲	
۱۴۱/۹	۶		۳	۱۱۳۸/۴	۸	۳	
۲۴۵/۳	۱۱	۲	۱	۱۸۰/۲	۲	۱	۲
۱۹۸/۴	۹		۲	۲۰۴۵/۶	۱۱	۲	
۳۰۷/۸	۹		۳	۱۷۶۷/۱	۱	۳	
۵۱/۳	۲	۳	۱	۱۴۶۲	۱۰	۱	۳
۰	۰		۲	۱۱۴۳/۹	۵	۲	



مراکز حمه آوری	کارخانه	تعداد مکان‌های	متوسط مصروف	سایت z	نقطه مشتری	تعداد دوره‌هایی که نقطه مشتری	متوسط تعداد محصول که نقطه
	۳	۱۰	۱۱۸۸/۶	۳		۸	۱۸۸/۴
۴	۱	۹	۴۵۳/۸	۱	۴	۸	۳۰۳/۱
	۲	۱۰	۲۳۸۹/۷	۲		۱۱	۴۰۵/۷
	۳	۸	۸۵۵/۴	۳		۱	۲۴۶/۳

جدول (۶) ارتقا کارایی سطح زنجیره در برابر ضریب پایداری مدل را در مقابل مقادیر مختلف ضریب  $\omega$  نشان می‌دهد. زمانی که  $\omega = 1500$ ، ۱۲ مکان احداث در دوره ۱ و در کارخانه ۳، از سطح ۲ به سطح ۳ و ۲ مکان احداث نیز در سایت ۱ و در دوره ۱۱، از سطح ۳ به سطح ۵ ارتقاء می‌یابند.

جدول ۷. ارتقاء کارایی سطح زنجیره در برابر ضریب پایداری مدل

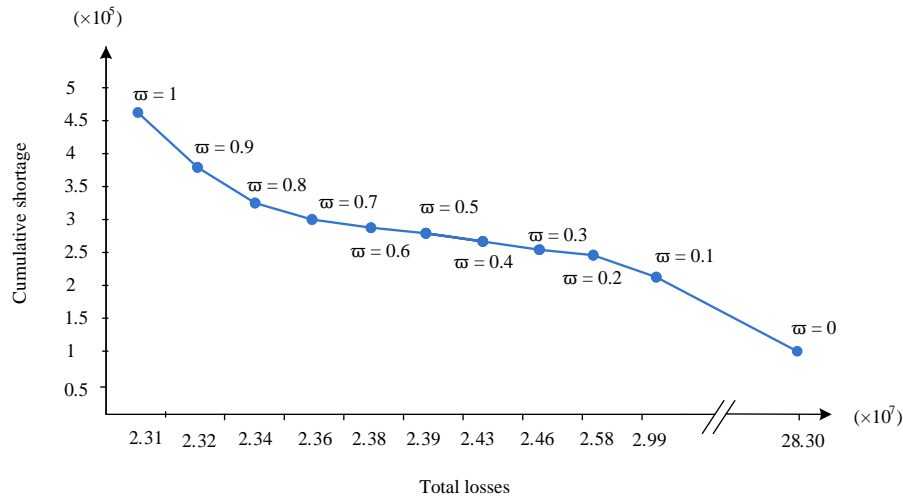
$\Omega$	ارتقاء سطح	کارخانه	دوره t														
			۱	۲	۳	۴	۵	۶	۷	۸	۹	۱۰	۱۱	۱۲			
۵۰۰	۲ → ۵	۲							۵								
	۳ → ۵	۲							۸								
۱۵۰۰	۲ → ۳	۲												۱			
	۲ → ۳	۳															۱۲
	۳ → ۵	۱															۲
۲۰۰۰	۲ → ۳	۳															۱۲
	۲ → ۴	۱															۱
۲۵۰۰	۱ → ۳	۳															۳
	۲ → ۳	۳															۱۲

مدل برنامه‌ریزی کلی چند هدفه تصادفی پایدار ارائه شده، یک مسئله چهار هدفه عدد صحیح مختلط است و توابع هدف آن در تضاد با یکدیگر هستند، از روش برنامه‌ریزی توافقی که یکی از روش‌های شناخته شده در حوزه تصمیم‌گیری چندمعیاره برای حل مسائل با توابع هدف متضاد است، استفاده می‌شود. برای بیان اهمیت در نظر گرفتن توأمان چهار تابع هدف زیان کل سیستم تولیدی و زنجیره تأمین و رضایت‌مندی مشتریان، سه مدل زیر جهت مقایسه معرفی می‌گردد:





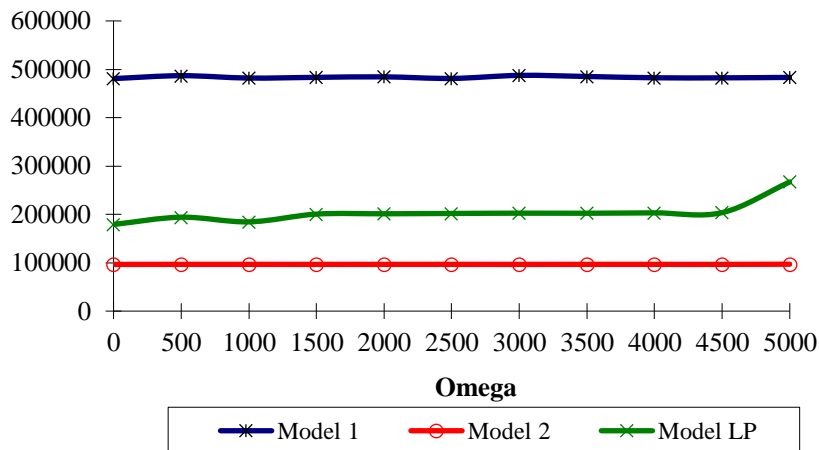
مدل اول: شامل تابع هدف کمینه نمودن زیان کل سیستم تولیدی و زنجیره تأمین؛  
مدل دوم: شامل تابع هدف بیشینه‌سازی رضایت‌مندی مشتریان از طریق کمینه نمودن بیشینه مجموع کمبود در میان تمام نقاط مشتری و در همه دوره‌ها.  
مدل سوم: شامل تابع هدف یکپارچه که ترکیبی نرمال شده از انحراف توابع هدف مدل اول و دوم از مقادیر بهینه آن‌هاست، با در نظر گرفتن تمامی محدودیت‌های هر دو مدل، سپس با تغییر مقادیر  $\omega$ ، یک سری از مسائل برنامه‌ریزی چند هدفه طرح و حل می‌شود. شکل (۲) نمایش گرافیکی از تعادل بین مقادیر  $Z1$ ،  $Z2$  را به ازای مقادیر مختلف  $\omega$  که از صفر - یک را نشان می‌دهد.



شکل ۲. زیان کل زنجیره تأمین در برابر کمبود تجمعی

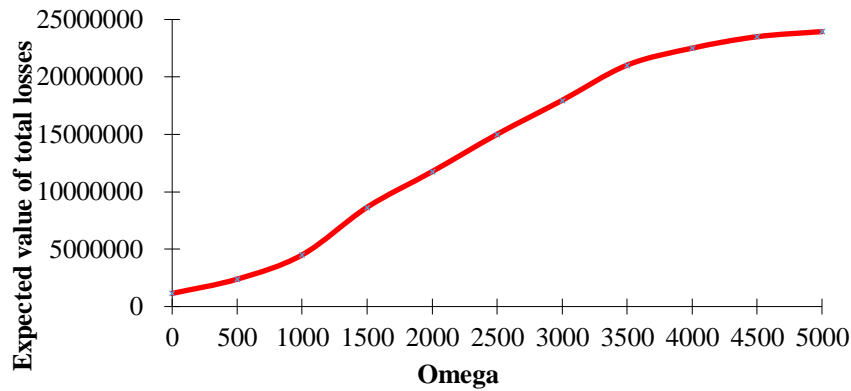


(b) ارزش انتظاری میزان تجمعی حداکثر کمبود

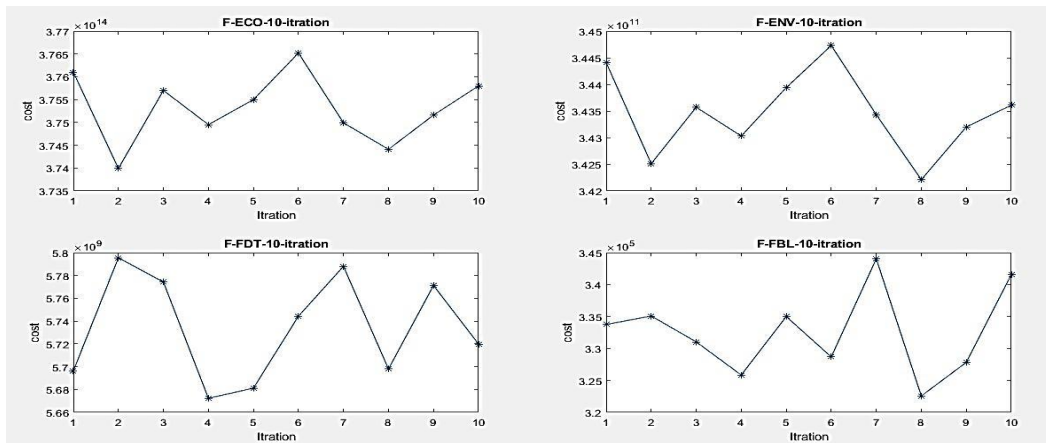


شکل ۳. تعادل بین پایداری مدل و توابع  $Z_1$  و  $Z_2$

شکل (۳) تحلیل حساسیت روی ضریب پایداری برای مدل‌های تک هدفه ۱ و ۲ و نیز مدل دو هدفه یکپارچه است. همان طور که شکل ۳-الف نشان می‌دهد، در مدل شماره ۲، مقدار تابع هدف  $Z_1$  با افزایش مقدار  $\omega$  به صورت نمایی افزایش پیدا می‌کند اما در مدل‌های شماره ۱ و مدل تابع هدف یکپارچه این افزایش در مقایسه با مدل شماره ۲ قابل ملاحظه نیست. این امر را می‌توان با ذکر این نکته که در مدل شماره ۲، جریمه انحراف از موجه نشدن جواب لحاظ نشده، توجیه نمود. شکل ۴ بهترین و بدترین مقادیر مدل‌های شماره ۱ و ۲ را نشان می‌دهد و نتیجه گرفت این مقادیر به مقدار ضریب پایداری مدل ( $\omega$ ) حساسیت نشان نمی‌دهد. در شکل (۴) یک تحلیل حساسیت برای پایداری مدل در مقابل پایداری جواب برای مقادیر تابع هدف اول ( $Z_1$ ) منتج شده از حل مدل تابع هدف یکپارچه گزارش شده است. همان طور که انتظار می‌رفت، با افزایش مقدار  $\omega$  مقادیر  $Z_1$  افزایش می‌یابد اما شیب این افزایش به تدریج کاهش می‌یابد.



شکل ۴. رابطه بین پایداری مدل و مقدار Z1 به دست آمده از مدل تابع هدف یکپارچه



شکل ۵. عملکرد مورد انتظار برای بهینه‌سازی

عملکردی که برای بهینه‌سازی ۱۰ راه‌حل در تکرار ۱ مورد انتظار است، در شکل (۵) نشان داده شده است. بر اساس نتایج، حل ۱ و ۴ ناممکن و سطح فروش و خدمات صفر است. حل ۳ و ۹ دارای سطح متوسط بوده که به آن ناکافی هم گفته می‌شود. در برابر آن‌ها حل‌های ۵ و ۲ و ۱۰ و ۸ دارای بهترین عملکرد که مورد انتظار می‌باشد. در جدول (۷) زمانی که زنجیره تأمین



موجود با زنجیره تأمین پیشنهادی مقایسه می‌شود، هزینه‌های عملیاتی ۲۰.۹٪ کاهش داشته است و به صورت هم‌زمان تاثیرات محیطی تقریباً ۲۰ مرتبه بهتر شده است و سطح خدمات مشتری بهبود یافته است. این نشان می‌دهد که شبکه ارائه شده در تمام اهداف عملکردی قوی داشته است.

جدول ۸. اجزای تابع هدف برای ده تکرار

تکرار	هزینه کل	هزینه انتشار گازهای گلخانه‌ایی	هزینه حمل	هزینه کمبود	هزینه ثابت و عملیاتی احداث تولیدکننده
۱	۹۹۲۸۰۵	۲۶۳۹۶۰	۱۵۵۴۹۰	۱۸۱۳۵	۴۲۴۱۸۰
۲	۹۴۵۵۸۰	۲۴۲۲۹۰	۱۵۴۸۰۰	۱۵۷۶۵	۴۰۸۲۲۵
۳	۹۶۳۸۲۹/۴	۲۴۶۵۰۰	۱۵۷۰۳۰	۷۲۲۹/۴	۴۲۳۹۶۰
۴	۹۴۴۵۷۹	۲۵۳۱۱۰	۱۵۲۰۶۰	۲۹۷۴	۴۰۷۸۰۵
۵	۹۶۸۵۲۷	۲۵۲۹۰۰	۱۵۴۸۳۰	۲۱۸۷۷	۴۱۱۷۳۰
۶	۹۶۷۷۳۵	۲۴۴۸۴۰	۱۵۶۳۵۰	۱۵۷۶۵	۴۲۳۲۰۰
۷	۹۵۸۵۳۰	۲۵۱۱۴۰	۱۵۵۰۳۰	۱۳۶۸۵	۴۱۱۶۳۵
۸	۹۴۵۹۴۸	۲۴۲۸۳۰	۱۵۴۱۸۰	۴۰۴۸	۴۱۸۴۷۰
۹	۹۳۴۰۴۸	۲۳۹۶۱۰	۱۵۰۳۴۰	۸۸۸۱	۴۰۸۹۵۷
۱۰	۹۸۱۰۵۶	۲۵۱۹۲۰	۱۵۷۸۵۰	۲۳۸۱۶	۴۱۹۰۷۰
ارزش انتظاری	۹۶۰۲۶۴/۷	۲۴۸۹۱۰	۱۵۴۷۹۶	۱۳۲۱۷/۵۴	415723.2
انحراف استاندارد	۱۸۲۱۱/۳۱	۷۱۷۸/۲۸۰۵	۲۲۳۵/۸۵	۷۲۱۳/۹۲۷	6760.7712

با توجه به توضیحات ذکر شده در فوق، در نهایت نتایج حاصل از روش تلفیقی برای چهار تابع هدف تعریف شده برای مدل اصلی در جدول (۸) نشان داده شده‌اند.

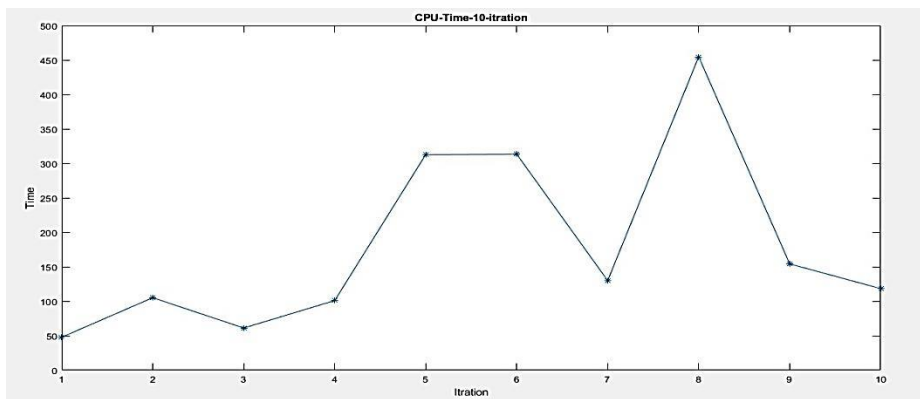
جدول ۹. نتایج اهداف مدل اصلی با توجه به هریک از تکرارها

تکرار	تابع هدف ۱	تابع هدف ۲	تابع هدف ۳	تابع هدف ۴
۱	1.3438e+14	1.1292e+11	9.2604e+09	140628
۲	3.7610e+14	3.4441e+11	5.6963e+09	333747
۳	3.7399e+14	3.4251e+11	5.7955e+09	335087
۴	3.7570e+14	3.4357e+11	5.7742e+09	331030
۵	3.7495e+14	3.4303e+11	5.6723e+09	325840
۶	3.7550e+14	3.4394e+11	5.6812e+09	334992



تکرار	تابع هدف ۱	تابع هدف ۲	تابع هدف ۳	تابع هدف ۴
۷	3.7652e+14	3.4473e+11	5.7443e+09	328672
۸	3.7499e+14	3.4343e+11	5.7880e+09	344037
۹	3.7441e+14	3.4221e+11	5.6980e+09	322564

همان طوری که از جدول (۸) قابل مشاهده می‌باشد، نتایج حاصل بیانگر این حقیقت هستند که یافته‌ها در تکرار شماره ۱ در مقایسه با دیگر تکرارها جواب‌های بهتری را نشان می‌دهند.



شکل ۶. روند زمان حل (بر اساس ثانیه)

با توجه به نتایج شکل (۶)، تکرار شماره ۱ کمترین زمان اجرا (۴۷ ثانیه) و تکرار هشتم با زمان اجرای ۴۵۰ ثانیه بیشترین زمان را نشان می‌دهد.

## ۵. نتیجه‌گیری و فرصت‌های پژوهشی آینده

در این پژوهش، مدل برنامه‌ریزی تصادفی برای برنامه‌ریزی تولید کلی در زنجیره تأمین تحت شرایط عدم قطعیت ارائه شده است. رویکردهای مورد استفاده ضمن یکپارچه نمودن متمرکز تصمیمات برنامه‌ریزی کلی و برنامه‌ریزی زنجیره تأمین، شامل دو گام اساسی می‌باشند: گام اول؛ تصمیمات کلان پیش‌تولید، نظیر میزان و نحوه تأمین مواد اولیه از تأمین‌کنندگان، برنامه‌ریزی لجستیک و حمل‌ونقل مربوط به آن، تعیین نرخ تولید و مدیریت نیروی انسانی در کارخانه‌های تولیدی مورد بررسی قرار می‌گیرد. گام دوم، با تحقق تصمیمات مربوط به گام اول، در مورد



میزان و نحوه نگهداری موجودی‌ها، میزان و نحوه توزیع کالا به مشتریان به همراه برنامه‌ریزی لجستیک آن، تصمیم‌گیری می‌شود. مدل پژوهش با فرضیه اساسی مانند عدم قطعیت در تقاضا برای محصولات مختلف، عدم قطعیت در تأمین، زمان تدارک و نیز پارامترهای هزینه‌ای و قوانین و مقررات زیست‌محیطی حاکم بر زنجیره‌های تأمین فرموله شده بودند. برای ارزیابی کارایی و کاربردپذیری مدل، مطالعه موردی ارائه شد و همچنین تحلیل حساسیت‌های مختلفی برای اعتبارسنجی مدل صورت گرفت. مدل با معرفی مفهوم بهره‌وری نیروی کار، ضمن یکپارچه نمودن تصمیمات مربوط به مدیریت منابع انسانی، برنامه کلی تولید صورت گرفته را در مواجهه با عدم قطعیت موجود در تقاضا منعطف‌تر سازد. نتایج نشان داد چگونه مقررات و قوانین بین-المللی نظیر مقررات زیست‌محیطی، انتشار گازهای گلخانه‌ای و پسماندهای صنعتی، می‌تواند ساختارهای برنامه کلی را تحت الشعاع قرار دهد و نیز در نظر گرفتن توابع غیرخطی واقعی برای تخفیف و کمبود، مدل‌هایی واقع‌بینانه‌تر ایجاد می‌کند و تصویر شفاف‌تری نسبت به آنچه در آینده بر اثر تحقق سناریوهای مختلف رخ خواهد داد، ارائه می‌دهد.

برای مطالعات آتی پیشنهاد می‌شود، اثرات متقابل قیمت و تقاضا را در مدل ریاضی مدنظر قرار دهند و اهداف دیگری مانند کیمنه‌سازی تغییر در سطح نیروی انسانی، پسماندهای صنعتی را در مدل مورد بحث و بررسی قرار دهند. همچنین می‌توان از الگوریتم‌های فراابتکاری دیگر برای بهینه‌سازی استفاده و یا یک الگوریتم ترکیبی جدید ارائه گردد. در این پژوهش، دو عامل هزینه و میزان انتشار گازهای گلخانه‌ای بررسی گردیده، پیش‌بینی می‌گردد، سایر عوامل مؤثر بر این زنجیره تأمین چهار سطحی شناسایی و بهینه‌سازی شوند.

## ۶- پی‌نوشت‌ها

1. Simchi-levi & Kaminsky
2. Khodaparasti
3. Dai
4. Brige

## ۷- منابع

- [1] Pishvae, M.S., & Rabbani, M., (2011). A graph theoretic-based heuristic algorithm for responsive supply chain network design with direct and indirect shipment. *Advances in Engineering Software*, 42(3), 57-63.
- [2] Morganti, E., & Gonzalez-Feliu, J., (2015). City logistics for perishable products.



- The case of the Parma's Food Hub. *Case Studies on Transport Policy*, 3(2), 120-128.
- [3] Khodaparasti, S., Bruni, M.E., Beraldi, P., Maleki, H.R., & Jahedi, S., (2018). A multi-period location-allocation model for nursing home network planning under uncertainty. *Operations Research for Health Care*.
- [4] Kovačić, D., Hontoria, E., Ros-McDonnell, L., & Bogataj, M., (2015). Location and lead-time perturbations in multi-level assembly systems of perishable goods in Spanish baby food logistics. *Central European journal of operations research*, 23(3), 607-623.
- [5] Jalalifar, S., Rasi Ehtesma, R., Mohtashami, A. (2021). Design a Fuzzy Goal Programming Model for Optimizing the Cost and Distance of Vehicles in the Four-Echelon Closed-Loop Supply Chain by Using Ant Colony Algorithm. *Modern Researches in Decision Making*, 6(1), pp.148-169.
- [6] Kodadaian, D., Radfar, R., Toloei, A. (2020). A Multi-Objective Green Supply Chain: Multi-Product Model Considering Uncertainty. *Modern Researches in Decision Making*, 5(3), 1-28.
- [7] Pishvae, M. S., & Razmi, J. (2012). Environmental supply chain network design using multi-objective fuzzy mathematical programming. *Applied Mathematical Modelling*, 36(8), 3433-3446.
- [8] Simchi-levi D. & Kaminsky, Ph. (2006). Effects of supply chain management practices, integration and competition capability on performance, (11)3, 1359-8546
- [9] Dai, Z., Aqlan, F., Zheng, X., & Gao, K., (2018). A location-inventory supply chain network model using two heuristic algorithms for perishable products with fuzzy constraints. *Computers & Industrial Engineering*.
- [10] Rafie-Majd, Z., Pasandideh, S.H.R., & Naderi, B., (2018). Modelling and solving the integrated inventory-location-routing problem in a multi-period and multi-perishable product supply chain with uncertainty: Lagrangian relaxation algorithm. *Computers & Chemical Engineering*, 109, 9-22.
- [11] Li, L., Dababneh, F., & Zhao, J., (2018). Cost-effective supply chain for electric vehicle battery remanufacturing. *Applied energy*, 226, 277-286.
- [12] Saif-Eddine, A.S., El-Beheiry, M.M., & El-Kharbotly, A.K. (2019). An improved



- genetic algorithm for optimizing total supply chain cost in inventory location routing problem. *Ain Shams Engineering Journal*, 2019, 10(1), 63-76.
- [13] Oh, J., & Jeong, B. (2019). Tactical supply planning in smart manufacturing supply chain. *Robotics and Computer-Integrated Manufacturing*, 2019, 55, 217-233.
- [14] Pellegrino, R., Costantino, N., & Tauro, D., (2019). Supply Chain Finance: A supply chain-oriented perspective to mitigate commodity risk and pricing volatility. *Journal of Purchasing and Supply Management*, 2019, 25(2), 118-133.
- [15] Moretto, A., Grassi, L., Caniato, F., Giorgino, M., & Ronchi, S., (2019). Supply chain finance: From traditional to supply chain credit rating. *Journal of Purchasing and Supply Management*, 25(2), 197-217.
- [16] Cole, R., & Aitken, J., (2019). The role of intermediaries in establishing a sustainable supply chain. *Journal of Purchasing and Supply Management*, 26(2).
- [17] Reimann, M., Xiong, Y., & Zhou, Y., (2019). Managing a closed-loop supply chain with process innovation for remanufacturing. *European Journal of Operational Research*, 276(2), 510-518.
- [18] Asim, Z., Jalil, S.A., & Javaid, S., (2019). An uncertain model for integrated production-transportation closed-loop supply chain network with cost reliability. *Sustainable Production and Consumption*, 17, 298-310.
- [19] Sun, S., & Wang, X., (2019). Promoting traceability for food supply chain with certification. *Journal of Cleaner Production*, 217, 658-665.
- [20] Wang, X., Guo, H., Yan, R., & Wang, X., (2018). Achieving optimal performance of supply chain under cost information asymmetry. *Applied Mathematical Modelling*, 53, 523-539.
- [21] Wu, T., Zhang, L.G., & Ge, T., (2018). Managing financing risk in capacity investment under green supply chain competition. *Technological Forecasting and Social Change*, 143, 37-44.