

## مدل یکپارچه تأمین، تولید و توزیع محصولات در زنجیره تأمین ناب و حل آن با الگوریتم‌های ژنتیک و پرش قورباغه

مرتضی جبلیه<sup>۱\*</sup>، حسین علی حسن پور<sup>۲</sup>

<sup>۱</sup> کارشناس ارشد، گروه مهندسی صنایع، دانشگاه جامع امام حسین، تهران، ایران (عهده‌دار مکاتبات)

<sup>۲</sup> استادیار، گروه مهندسی صنایع و لجستیک، دانشگاه جامع امام حسین، تهران، ایران

تاریخ دریافت: مهر ماه ۱۳۹۸، اصلاحیه: آذر ماه ۱۳۹۸، پذیرش: بهمن ماه ۱۳۹۸

### چکیده

زنجیره تأمین توالی مراحل مربوط به فرآیند تولید را بیان می‌کند، از تهیه مواد اولیه تا عرضه محصولات نهایی به بازار مشتری. در این پژوهش، مدل یکپارچه ریاضی برای برنامه‌ریزی، تأمین، تولید و توزیع محصولات در یک شبکه زنجیره تأمین ناب ارائه شده است. مدل پیشنهادی با در نظر گرفتن سطح نگهداری موجودی محصولات و عقد و فسخ قراردادهای هزینه‌های کل زنجیره تأمین را کاهش می‌دهد. زنجیره تأمین مورد مطالعه شامل چند محصول و چندین ماده اولیه با چهار سطح تأمین‌کنندگان، تولیدکنندگان، توزیع‌کنندگان و مشتریان در چند دوره زمانی است. مدل پیشنهادی، عقد و فسخ قرارداد برای تأمین‌کنندگان و تولیدکنندگان را برنامه‌ریزی می‌کند و نشان می‌دهد در چه دوره‌هایی باید عقد و فسخ قرارداد صورت گیرد. برای اعتبارسنجی مدل ریاضی از نرم‌افزار گمز استفاده شده است. سپس دو الگوریتم فراابتکاری شامل الگوریتم ژنتیک و پرش قورباغه ارائه شده است و برای اعتبارسنجی، نتایج آن‌ها با نرم‌افزار دقیق مقایسه شده است. در پایان با تحلیل حساسیت، رفتار مدل به ازای تغییر در پارامترهای اساسی مسئله مورد واکاوی قرار گرفته است.

**واژه‌های اصلی:** برنامه‌ریزی تأمین - تولید و توزیع، طراحی شبکه زنجیره تأمین ناب، الگوریتم ژنتیک، الگوریتم پرش قورباغه

### ۱- مقدمه

در سازمان‌ها، عملیاتی همانند خرید، تأمین و تدارک، تولید، توزیع، حمل و نقل، کنترل (موجودی، هزینه‌ها و...) و عملیات پشتیبانی ابعاد و دامنه‌ی وسیعی دارند؛ که بر وسعت این عملیات با توجه به گستردگی کمی و کیفی سازمان‌ها افزوده می‌شود. از طرفی عملیات ذکرشده نیازمند نگهداری و تعمیرات وسایل و تجهیزات، کنترل کمیت و کیفیت کالاها و اقلام، خدمات پس از فروش و... هستند که باید به‌طور منظم و هماهنگ در سازمان انجام گیرد. تمام ابزارها، امکانات و تلاش‌ها در این زمینه برای بهبود کلیه‌ی فرآیندها و حرکت روبه‌جلو، مرتبط با مباحث زنجیره تأمین است که دغدغه قابل‌ملاحظه برای سازمان‌ها است. فلسفه ناب گویای آن است که شما باید محصولات، اقلام و خدمات موردنظر مشتری را با بیشترین کارایی ممکن در زمانی که مدنظر مشتری است تأمین و تولید کرده و در اختیار او قرار دهید. در حقیقت ناب بودن یعنی بیشینه کردن منابع انسانی به‌منظور کمینه کردن انواع ضایعات و تلفات و ارضای بهتر نیازهای مشتریان، درواقع مفهوم کلیدی فلسفه ناب استفاده از ابزارهای ساده برای کاستن ضایعات و کاهش هزینه در کلیه فعالیت‌های زنجیره تأمین است. هدف اصلی این تحقیق ارائه مدلی جامع برای کمینه کردن

هزینه‌های زنجیره تأمین و بررسی میزان عقد و فسخ قرارداد با تأمین

کنندگان و تولیدکنندگان است [۱]. در این مقاله، پس از مروری بر ادبیات موضوع به تعریف مسئله پرداخته و در ادامه مدل ریاضی مسئله، مفروضات و محدودیت‌های آن بیان می‌شود. پس از اجرای مدل معرفی‌شده نتایج حاصل از مدل، تحلیل حساسیت و پیشنهادهایی در زمینه مطالعات آتی ارائه خواهد شد.

### ۲- مرور ادبیات

مباحث مربوط به زنجیره تأمین در همه سازمان‌ها و در تمامی سطوح آن (تأمین‌کننده، تولیدکننده، توزیع‌کننده و...) از دیرباز از اهمیت و ضرورت ویژه‌ای برخوردار است. در این راستا پژوهش‌ها و تحقیقات گسترده‌ای در مورد زنجیره تأمین چندهدفه و در تمام سطوح آن صورت پذیرفته است که رویکردهایی مانند ناب بودن را موردبررسی قرار داده‌اند. طی چند دهه گذشته، تحقیقات بسیاری در حوزه طراحی زنجیره تأمین انجام‌گرفته است، لیو و لی [۲] برای اولین بار در سال ۲۰۰۳ به مدل‌سازی این مسئله پرداختند. سجادی و داوودپور [۳] در سال ۲۰۱۲ به ارائه یک شبکه زنجیره تأمین چند کالایی پرداختند که در آن نوع حمل و نقل،

\*morteza.j89@gmail.com

چهارسطحی با چندین نوع محصول در چند دوره زمانی ارائه شده است. اهداف مسئله علاوه بر کمینه کردن کل هزینه‌های زنجیره، مقدار فروش ازدست‌رفته محصولات در صورت عدم برآورده‌سازی تقاضای مشتریان را نیز به حداقل می‌رساند. به‌منظور حل مسئله از الگوریتم بهینه‌سازی اجتماع ذرات چندهدفه استفاده شده و نتایج حاصله با الگوریتم ژنتیک با مرتب‌سازی نامغلوب مقایسه شده است. حسن‌پور و جبلة [۱۳] مدلی تلفیقی شامل تصمیم‌گیری چندمعیاره و برنامه‌ریزی ریاضی را برای انتخاب تأمین‌کنندگان و توزیع‌کنندگان با قابلیت عقد و فسخ قرارداد در زنجیره تأمین ارائه کردند. ساختار ارائه شده متشکل از دو زیرمدل کیفی و کمی است. زیرمدل کیفی، با بهره‌گیری از فن اولویت‌بندی براساس تحلیل سلسله‌مراتبی به ارزیابی کیفی تأمین‌کنندگان و توزیع‌کنندگان می‌پردازد؛ سپس در زیرمدل کمی، عقد و فسخ قراردادها، میزان حجم سفارش‌دهی به تأمین‌کنندگان براساس اولویت‌های معین شده در مرحله کیفی با استفاده از برنامه‌ریزی ریاضی چندهدفه مشخص می‌شود. در پژوهش ذگردی و مرندي [۱۴] به بررسی زمان‌بندی یکپارچه تولید و توزیع در زنجیره‌تأمین سه‌مرحله‌ای شامل تولیدکننده، ناوگان حمل و نقل کالاها و مشتریان پرداخته شده است. مدل به صورت برنامه‌ریزی غیرخطی عدد صحیح آمیخته با هدف کمینه کردن هزینه‌های تأخیر تولید و هزینه‌های مسافت فرموله شده است. با توجه به سخت بودن مسئله از الگوریتم بهبودیافته بهینه‌سازی ازدحام ذرات (IPSO) استفاده شده است. در این الگوریتم از اپراتورهای بهبود 1-opt و 2-opt برای جستجوی گسترده فضای جواب و جلوگیری از همگراشدن سریع به جواب بهینه محلی استفاده شده است. به منظور اعتبارسنجی روش حل پیشنهادی، الگوریتم ارائه شده در ابعاد کوچک و بزرگ با جواب دقیق مقایسه شده که نتایج حاکی از برتری الگوریتم IPSO پیشنهادی و کارایی آن است.

توجه به هر سه بخش تأمین، تولید و توزیع در زنجیره تأمین در مقالات متعددی دیده می‌شود، مانند پژوهش چن و لی [۱۵] که حیطه موردنظر را با تنها یک محصول در یک دوره موردبررسی قرار داده و با توجه به ظرفیت اجزای مختلف زنجیره و تعداد قابل‌استفاده از هر کدام از امکانات، هزینه کل را مینیمم کرده است. چن و همکاران [۱۶] تقاضای احتمالی برای یک محصول در چند دوره زمانی با در نظر گرفتن سطح سرویس-دهی و ظرفیت هر یک از امکانات برای مینیمم‌سازی هزینه‌های زنجیره تأمین در نظر گرفته‌اند. چنگ و همکاران [۱۷] مسئله بهینه‌سازی تأمین مواد، تولید و توزیع محصول را برای یک تولیدکننده و لجستیک شخص ثالث برنامه‌ریزی کردند. در مدل آن‌ها کمینه‌کردن هزینه‌های حمل و نقل و موجودی مواد، تولید و توزیع برای محصولات نیمه‌تمام در نظر گرفته شده است، این محصولات نیمه‌تمام دارای سه حالت مختلف هستند: در حالت اول، محصولات نیمه تمام دارای اندازه یکسان هستند و برای حل آن از یک الگوریتم بهینه استفاده شده است؛ در حالت دوم، محصولات نیمه‌تمام دارای زمان پردازش یکسان و الگوریتم تقریبی برای حل پیشنهاد شده است؛ در حالت سوم، محصولات نیمه‌تمام دارای اندازه و زمان پردازش دلخواه هستند و الگوریتم تقریبی برای حل آن استفاده

زمان تحویل و هزینه موجودی را در نظر گرفتند و هدف کمینه کردن هزینه‌ها بود. آلتیپارماک و همکاران [۴] یک مدل برنامه‌ریزی عدد صحیح غیرخطی برای طراحی زنجیره تک‌محصولی با یک ماده اولیه و چهار سطح تأمین‌کنندگان، تولیدکنندگان، توزیع‌کنندگان و مشتریان را در یک دوره زمانی معرفی کرده‌اند. در این مدل با فرض رضایت مشتری، تولیدکننده و توزیع‌کننده مکان‌یابی شده‌اند. مدل موردنظر شامل سه هدف کمینه‌سازی هزینه‌های زنجیره تأمین، بیشینه‌سازی خدمات به مشتریان و تعادل ظرفیت بهره‌برداری است. این مدل با استفاده از الگوریتم ژنتیک حل شده است. صحرائیان و همکاران [۵] با فرض چند محصول و چند ماده اولیه، زنجیره تأمین ارائه شده از سوی آلتیپارماک و همکاران را ارتقاء دادند. فرخزاد و همکاران [۶] یک مدل برنامه‌ریزی عدد صحیح مختلط باهدف کاهش هزینه‌های کل زنجیره تأمین در افق برنامه‌ریزی را ارائه دادند. این هزینه‌ها شامل هزینه‌های تولید، خرید مواد اولیه، ضایعات، موجودی مواد اولیه و ... است؛ سپس برای حل مدل در ابعاد کوچک و با توجه به زمان حل از نرم‌افزار Lingo و برای حل مسائل در ابعاد بزرگ از فراابتکاری ژنتیک استفاده شده است.

محققان زیادی در زمینه طراحی و مدل‌سازی اجزای مختلف مسئله یکپارچه تولید (تأمین)- توزیع به مطالعه پرداخته‌اند. در این راستا کاظمی و همکاران [۷] در تحقیقی با عنوان "ارائه مدلی به‌منظور برنامه‌ریزی یکپارچه تولید- توزیع در یک زنجیره تأمین" مدلی دو هدفه برای مسئله تولید و توزیع یکپارچه در یک زنجیره تأمین سه سطحی برای چند نوع محصول و در طی چند دوره زمانی ارائه دادند. توابع هدف شامل کمینه کردن هزینه‌های زنجیره تأمین و هزینه‌های مربوط به انبارهای توزیع می‌شود. در نهایت برای حل مدل از روش  $L_p$ -متریک استفاده شده است. بیلماز و کتی [۸] مسئله برنامه‌ریزی استراتژیک را برای یک شبکه تولید و توزیع سه مرحله‌ای ارائه کردند. مسئله موردنظر شامل چند تأمین‌کننده، تولیدکننده و توزیع‌کننده است. این مدل برای یک محصول در یک شبکه تولید- توزیع با تقاضای قطعی و باهدف کمینه کردن هزینه‌های تولید، حمل‌ونقل و موجودی است. لیو و پاپاجورجیو [۹] یک مدل برنامه‌ریزی تولید- توزیع دوسطحی را با در نظر گرفتن هم‌زمان هزینه، پاسخ‌دهی و سطح خدمت به مشتری ارائه دادند. آن‌ها به‌منظور حل مدل از دو روش  $E$ -محدودیت و لکسیکوگراف استفاده کردند. نیکنام-فر و همکاران [۱۰] مسئله برنامه‌ریزی تولید و توزیع با رویکرد بهینه‌سازی استوار را برای طراحی شبکه زنجیره تأمین سه سطحی پیشنهاد دادند. در این پژوهش، تقاضای مصرف‌کنندگان و هزینه‌های حمل‌ونقل در روش‌های مختلف حمل‌ونقل غیرقطعی است و از رویکرد بهینه‌سازی استوار استفاده شده است. در پژوهش سلطانی‌تهرانی و همکاران [۱۱] حالت چند دوره‌ای و چندمحصولی در زنجیره تأمین چندسطحی باهدف کاهش هزینه‌های اجاره مراکز، هزینه‌های حمل‌ونقل بین مراکز و هزینه پردازش داخل مراکز در نظر گرفته شده است. مدل پیشنهادی با استفاده از نرم‌افزار Cplex12.3 در قالب یک مطالعه موردی حل گردیده است. در پژوهش کاظمی و همکاران [۱۲] مدل ریاضی دو هدفه جدیدی برای مسئله برنامه‌ریزی یکپارچه تولید- توزیع در یک زنجیره تأمین

سپس برای مسائل در سایز بزرگ با الگوریتم‌های فراابتکاری ازدحام ذرات و رقابت استعماری حل شده است. ناگرونی [۲۴] طراحی مجدد شبکه زنجیره تأمین را باهدف حداقل کردن هزینه‌ها و ارضای تقاضای مشتریان موردبررسی قرار می‌دهد. در مطالعه‌ی مذکور، شبکه‌ی زنجیره تأمین شامل مراکز تولید، انبار و مراکز پخش با تعیین سطح‌های مختلف ظرفیت و جریان مواد، طراحی مجدد می‌شود. آلتیپارماک و همکارانش [۲۵] در طراحی شبکه زنجیره تأمین، تصمیم‌گیری در مورد باز یا بسته بودن تسهیلات (کارخانه‌ها و مراکز پخش) و طراحی شبکه توزیع را با هدف کمینه کردن هزینه‌ها را مورد مطالعه قراردادند. زنجیره تأمین موردنظر چندسطحی، چندمحصولی است. اثربخشی روش مورد استفاده با نتایج به‌دست‌آمده از سیپلکس، ابتکاری، لاگرانژ، الگوریتم ژنتیک و شبیه‌سازی تبرید برای مسائل با اندازه‌های مختلف مقایسه و ارزیابی شده است. در مدل بشیری و خراسانی [۲۶] رفتار عقد و فسخ قراردادها با تابع هدف و محدودیت‌هایی در این زمینه با استفاده از مدل ریاضی مورد تجزیه و تحلیل قرار گرفته است.

تحقیقات بسیاری در زمینه نابی زنجیره تأمین انجام شده است (مانند تحقیق کاظمی و همکاران [۷]) که هزینه‌هایی مانند تولید و آماده‌سازی، هزینه نگهداری موجودی محصول در انبارها، هزینه‌های خرید و حمل و نقل برای تعداد معدودی از اجزای زنجیره تأمین در نظر گرفته‌اند؛ اما هزینه‌هایی مانند عقد و فسخ قرارداد و همچنین جریمه تأخیر در تحویل محصول نهایی برای اعضای زنجیره که می‌توانند بر فعالیت‌های افراد و سازمان‌ها تأثیر بگذارند و بیانگر نوع روابط، نحوه تعاملات، میزان اعتمادپذیری عناصر زنجیره‌ای باشند که در شرایط مختلف، با هم کار می‌کنند. در تحقیقات گذشته، این موارد بطور کلی و برای تمام اجزا در طراحی زنجیره‌های تأمین، ملاحظه نشده است.

در این پژوهش از مدل پیشنهادی کاظمی و همکاران [۷] به‌عنوان مدل اولیه استفاده شده است. در مدل آن‌ها، هزینه‌های تولید و آماده‌سازی، هزینه نگهداری موجودی محصول در انبارها، هزینه‌های خرید و حمل و نقل برای تولیدکننده و هزینه‌های حمل‌ونقل و نگهداری موجودی در انبارهای توزیع‌کننده برای توزیع‌کنندگان در شبکه‌ای سه‌سطحی بررسی شده است. در پژوهش حاضر، یک شبکه چهارسطحی با در نظر گرفتن هزینه نگهداری موجودی و محصول، هزینه‌های خرید-تأمین و تولید، هزینه‌های حمل‌ونقل برای تأمین‌کنندگان، تولیدکنندگان و توزیع-کنندگان مورد بررسی قرار گرفته است. همچنین هزینه عقد و فسخ قراردادها برای مرحله تأمین و تولید، جریمه تأخیر در تحویل محصول نهایی برای تمام اعضای زنجیره نیز در نظر گرفته شده است که در مطالعه کاظمی و همکاران به آن توجهی نشده است؛ بنابراین مدل دوهدفه پژوهش کاظمی و همکاران به مدل سه‌هدفه، شامل هزینه‌های تأمین‌کنندگان، تولیدکنندگان و توزیع‌کنندگان توسعه داده شده است. در این راستا از فراابتکاری کارای پرش قورباغه در حل مسائل مختلف نیز استفاده شده است.

براین اساس، در مدل کاظمی و همکاران تغییراتی ایجاد شده است که در بخش روش تحقیق، نحوه مدل کردن مسئله مطرح می‌شود و مثال‌های

شده است. توکلی‌مقدم و همکاران [۱۸] مدل یکپارچه خرید، تولید و توزیع در قالب برنامه‌ریزی عدد صحیح مختلط فازی ارائه کردند. در ادامه برای حل مدل فازی از دو روش رتبه‌بندی اعداد فازی، به قطعی معادل آن تبدیل کردند. برای اعتبارسنجی و عملکرد مدل پیشنهادی، مدل با استفاده از داده‌های تصادفی تولید شده و با در نظر گرفتن داده‌های فازی و به ازای مقادیر مختلف  $\alpha$  توسط نرم‌افزار لینگو حل شده است. اوسان و سالی [۱۹] یک زنجیره تأمین چندهدفه، چند محصولی و چندسطحی را با سه هدف بیشینه‌کردن سود سرمایه‌گذاران، کاهش ریسک و کمینه‌کردن انتشار ضایعات محیطی در کل زنجیره تأمین پیشنهاد دادند. آن‌ها جهت حل مدل در ابعاد بزرگ از یک الگوریتم توسعه‌یافته *tabu search* و در ابعاد کوچک از نرم‌افزار GAMS استفاده کردند و نتایج بدست آمده با یکدیگر مقایسه شده است. چن و چانگ [۲۰] زنجیره تأمین سه سطحی را با چند تأمین‌کننده، چند تولیدکننده، چند مرکز توزیع و چند مرکز فروش در چند دوره زمانی مورد بررسی قراردادند. آن‌ها هزینه‌هایی مانند هزینه‌های خرید، تولید و توزیع را در نظر گرفتند. در تحقیق یوسفی و همکاران [۲۱] مدل ریاضی چندهدفه برای برنامه‌ریزی تولید ادغامی برای زنجیره تأمین برگشت‌پذیر طراحی شده است. زنجیره تأمین مورد مطالعه سه‌سطحی و شامل چندین تأمین‌کننده، یک تولیدکننده و تعدادی مشتری است. این زنجیره متشکل است از مرکز بازسازی برای اصلاح کالاهای مرجوعی از مشتریان و مرکز نگهداری و تعمیرات برای ترمیم یا انهدام محصولات که مدت زمان گارانتی آنها سپری شده است و به‌وسیله مشتری عودت می‌شوند. در مدل پیشنهادی هدف نخست عبارت است از حداقل کردن هزینه‌ها (شامل هزینه‌های تولید کالا، تأمین، نگهداری و کمبود موجودی و هزینه‌های مرتبط با نیروی انسانی)، دومین و سومین هدف نیز به ترتیب حداکثر کردن رضایت مشتریان و رضایت تأمین‌کنندگان است. همچنین کیفیت محصولات تولیدی هدف دیگر مدل است. برای حل مدل پیشنهادی از روش P-L متریک و نرم‌افزار LINGO استفاده شده است. مدل پیشنهادی یک‌بار با مثال عددی و بار دیگر با استفاده از داده‌های واقعی برگرفته از زنجیره تأمین برگشت‌پذیر مربوط به یک صنعت Military حل شده است. ترابی و حسینی [۲۲] یک مدل چندهدفه برای برنامه‌ریزی خرید، تولید و توزیع در یک زنجیره تأمین چندسطحی، چندمحصولی و چنددوره‌ای را مطرح کردند، در حل مدل از روش دوفازی تعاملی استفاده شده است. در فاز اول، برنامه‌ریزی با به کار بردن راهبردهای مناسب به یک مدل چندهدفه قطعی تبدیل می‌شود. سپس یک روش جدید فازی TH برای پیدا کردن جواب‌های موجه بکار می‌رود. طهماسبی و همکاران [۲۳] یک مدل ریاضی برنامه‌ریزی خطی عدد صحیح مختلط تک‌هدفه را ارائه دادند که همزمان علاوه بر طراحی زنجیره تأمین چند سطحی، مسئله مکان‌یابی تسهیلات را نیز در نظر می‌گیرد. در این مدل اهداف مختلفی مانند کمینه‌سازی هزینه‌های بخش تأمین و تولید اجزای محصولات، تهیه و تولید محصولات، نگهداری و ارسال محصولات به مراکز توزیع، ارسال به مناطق مشتریان و هزینه استقرار کارخانه‌ها و مراکز توزیع وجود دارد. برای ارزیابی مدل پیشنهادی، ابتدا مدل ریاضی با نرم‌افزار بهینه‌سازی گمز کدنویسی شده و

دارد. ۲- زنجیره تأمین روبه‌جلو است و امکان بازگشت، بازسازی یا دورریز محصول وجود ندارد. ۳- پارامترهای مسئله موجود است و مدل برای شرایط قطعیت و اطمینان کامل طراحی شده است. ۴- ظرفیت تسهیلات مشخص است. ۵- زنجیره تأمین چهارسطحی، شامل تأمین‌کنندگان، تولیدکنندگان، توزیع‌کنندگان و مشتریان است. ۶- مکان‌های مربوط به سطوح زنجیره تأمین از قبل مشخص است. ۷- تمامی مراکز توزیع و مراکز مشتریان بدون نیاز به عقد و فسخ قرارداد هستند. ۸- هیچ الزامی وجود ندارد که تمامی قطعات اولیه برای یک کارخانه و محصولات نهایی برای مراکز توزیع تنها توسط یک تأمین‌کننده یا تولیدکننده برآورده شود. ۹- تمام نیاز مشتریان برآورده می‌شود. ۱۰- نگهداری موجودی در محل کارخانه‌ها و مراکز توزیع امکان‌پذیر است.

۲-۳- مجموعه‌ها

تعداد تأمین‌کنندگان	$f \in F$
تعداد تولیدکنندگان	$i \in I$
تعداد توزیع‌کنندگان	$j \in J$
تعداد مشتریان	$k \in K$
تعداد محصولات	$h \in H$
تعداد مواد خام	$r \in R$
دوره زمانی	$t \in T$

۳-۳- پارامترها

$G_f$  حداقل تعداد موادخام فرستاده‌شده از هر تأمین‌کننده به تولیدکننده-ها

$G_i$  حداقل تعداد محصول نهایی فرستاده‌شده از هر تولیدکننده به توزیع‌کننده‌ها

$D_{kht}$  تقاضای محصول  $h$  در رده مصرف‌کننده  $k$  در دوره  $t$

$CM_{rht}$  ضریب مصرف ماده خام  $r$  در تولید محصول  $h$

$COS_{fht}$  هزینه تأمین ماده خام نوع  $r$  توسط تأمین‌کننده  $f$  در دوره  $t$

$COP_{iht}$  هزینه تولید محصول نوع  $h$  توسط تولیدکننده  $i$  در دوره  $t$

$CHS_{irt}$  هزینه نگهداری موجودی ماده خام نوع  $r$  توسط تولیدکننده  $i$  در دوره  $t$

$CHP_{iht}$  هزینه نگهداری موجودی هر واحد محصول نوع  $h$  توسط تولیدکننده  $i$  در دوره زمانی  $t$

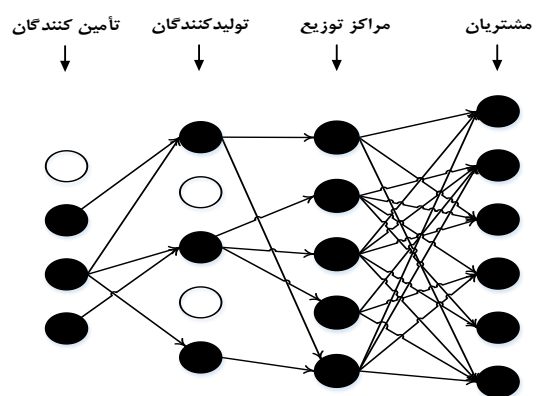
$CHD_{jht}$  هزینه نگهداری موجودی هر واحد محصول نوع  $h$  توسط تولیدکننده  $j$  در دوره زمانی  $t$

$CSS_{fht}$  ظرفیت تأمین هر واحد ماده خام  $r$  توسط تأمین‌کننده  $f$  در دوره  $t$

متعدد حل شده و نتایج آن با فرآینت‌های مذکور مورد تجزیه و تحلیل قرار می‌گیرد. در بخش تحلیل حساسیت، تأثیر تغییر پارامترهای ضروری بر عقد و فسخ قراردادها انجام شده تا بررسی‌های جامعی در این زمینه نیز صورت گرفته باشد.

۳- تعریف مسأله

زنجیره تأمین مورد مطالعه، دربرگیرنده چهار سطح برای تأمین‌کننده‌ها، تولیدکننده‌ها، مراکز توزیع و مشتریان نهایی است. تصمیمات برای چند محصول و در طی چند دوره زمانی گرفته می‌شود. در این زنجیره، مواد اولیه توسط تأمین‌کننده با ظرفیت مشخص در دوره مربوطه برای تولیدکننده ارسال می‌شود. تولیدکنندگان بر اساس حجم مواد ورودی، ظرفیت و دوره مشخص زمانی تقاضای توزیع‌کنندگان را با توجه به ظرفیتشان تأمین می‌کنند. در نهایت این محصولات با توجه به تقاضای مشتریان به دست آنان می‌رسد. یک تولیدکننده محصولات مختلفی را تولید می‌کند و حتی می‌تواند تمامی محصولات را نیز تولید کند. با توجه به در نظر گرفتن عقد و فسخ قرارداد برای تأمین‌کننده و تولیدکننده، شکل (۱) نمونه‌ای از شبکه زنجیره تأمین مورد مطالعه با توجه به تأمین‌کنندگان و تولیدکنندگان فعال را نشان می‌دهد. هدف این تحقیق برنامه‌ریزی تأمین، تولید و توزیع محصولات در یک زنجیره تأمین چهارسطحی با در نظر گرفتن اهداف، شامل کمینه‌کردن هزینه‌های کل زنجیره و به حداقل رساندن هزینه‌های موجود برای انبارها در هر سطح پیش‌بینی شده است. این اهداف در زنجیره تأمین می‌توانند غیر همراستا باشند زیرا از یک سو هر سطح به دنبال کمینه‌کردن هزینه‌های کل زنجیره و از طرف دیگر به حداقل رساندن هزینه‌های سطح خود است؛ لذا کمینه‌کردن هزینه‌های یک سطح از زنجیره می‌تواند منجر به افزایش هزینه‌های کل زنجیره شود، بنابراین می‌توان سه هدف برای مسئله در نظر گرفت. در ادامه مدل‌سازی مسئله با ذکر جزئیات ارائه می‌گردد.



شکل (۱): شبکه زنجیره تأمین مورد مطالعه با توجه به تأمین‌کنندگان و تولیدکنندگان فعال

۳-۱- مفروضات مدل

زنجیره تأمین چنددوره‌ای است و به برنامه‌ریزی تولید و توزیع چند-محصول می‌پردازد که هر محصول برای تولید به چند ماده‌ی اولیه نیاز

$Y_{it}$  اگر مجموع محصول فرستاده‌شده از تولیدکننده  $i$  به انبارها از  $G_i$  کم‌تر باشد، یک، در غیر این صورت صفر.

$W_{ft}$  اگر در دوره  $t$  با تأمین‌کننده  $f$  عقد قرارداد داشته باشیم، یک، در غیر این صورت صفر است.

$W_{it}$  اگر در دوره  $t$  با تولیدکننده  $i$  عقد قرارداد داشته باشیم، یک، در غیر این صورت صفر است.

$\hat{W}_{ft}$  اگر در دوره  $t$  با تأمین‌کننده  $f$  فسخ قرارداد داشته باشیم، یک، در غیر این صورت صفر است.

$\hat{W}_{it}$  اگر در دوره  $t$  با تولیدکننده  $i$  فسخ قرارداد داشته باشیم، یک، در غیر این صورت صفر است.

$QS_{firt}$  تأمین ماده خام  $r$  توسط تأمین‌کننده  $f$  در دوره  $t$ .

$QP_{ihjt}$  تولید محصول  $h$  توسط تولیدکننده  $i$  در دوره  $t$ .

$QD_{jhjt}$  توزیع محصول  $h$  توسط توزیع‌کننده  $j$  در دوره  $t$ .

$IS_{irt}$  موجودی ماده خام  $r$  برای تولیدکننده  $i$  در دوره  $t$ .

$IP_{ihjt}$  موجودی محصول  $h$  برای تولیدکننده  $i$  در دوره  $t$ .

$ID_{jhjt}$  موجودی محصول  $h$  برای توزیع‌کننده  $j$  در دوره  $t$ .

$WS_{firt}$  اگر ماده خام  $r$  توسط تأمین‌کننده  $f$  در دوره  $t$  تأمین شود ۱ در غیر این صورت صفر است.

$WP_{ihjt}$  اگر محصول  $h$  توسط تولیدکننده  $i$  در دوره  $t$  تولید شود ۱ در غیر این صورت صفر است.

### ۳-۵- توابع هدف و محدودیت‌ها

توابع هدف مدل به‌صورت زیر است:

$$F_1 = \text{Min} \left( \sum_{f=1}^F \sum_{t=1}^T F_{ft} * W_{ft} * (1 - W_{f,t-1}) \right. \\ + \sum_{f=1}^F \sum_{t=1}^T \hat{F}_{ft} * \hat{W}_{ft} * W_{f,t-1} \\ + \sum_{f=1}^F \sum_{r=1}^R \sum_{t=1}^T \text{COS}_{firt} * QS_{firt} \quad (1) \\ + \sum_{f=1}^F \sum_{i=1}^I \sum_{r=1}^R \sum_{t=1}^T \text{CTS}_{firt} * X_{firt} \\ + \sum_{f=1}^F \sum_{i=1}^I \sum_{r=1}^R \sum_{t=1}^T \text{TS}_{firt} * X_{firt} * Q \left. \right)$$

$CPP_{ihjt}$  ظرفیت تولید هر واحد محصول  $h$  توسط تولیدکننده  $i$  در دوره  $t$ .

$CS_{firt}$  ظرفیت تأمین‌کننده  $f$  برای ماده خام  $r$  در دوره  $t$ .

$CP_{ihjt}$  ظرفیت تولیدکننده  $i$  برای محصول  $h$  در دوره  $t$ .

$CD_{jhjt}$  ظرفیت توزیع‌کننده  $j$  برای محصول  $h$  در دوره  $t$ .

$HD_{jhjt}$  ظرفیت نگهداری توزیع‌کننده  $j$  برای محصول  $h$  در دوره  $t$ .

$CTS_{firt}$  هزینه حمل ماده خام  $r$  از تأمین‌کننده  $f$  و تحول آن به مرکز تولید  $i$  در دوره  $t$ .

$CTP_{ijht}$  هزینه حمل و خرید هر واحد محصول  $h$  از تولیدکننده  $i$  به مرکز توزیع  $j$  در دوره  $t$ .

$CTD_{jkht}$  هزینه حمل هر واحد محصول  $h$  از توزیع‌کننده  $j$  به مشتری  $k$  در دوره  $t$ .

$TS_{firt}$  تعداد روزهای متحمل تأخیر در تأمین ماده خام  $r$  توسط تأمین‌کننده  $f$  و تحویل آن به تولیدکننده  $i$  در دوره  $t$ .

$TP_{ijht}$  تعداد روزهای تأخیر در تحویل محصول نهایی  $h$  توسط تولیدکننده  $i$  و تحویل آن به توزیع‌کننده  $j$  در دوره  $t$ .

$TD_{jkht}$  تعداد روزهای تأخیر در تحویل محصول نهایی  $h$  توسط توزیع‌کننده  $j$  و تحویل آن به مشتری  $k$  در دوره  $t$ .

$F_{ft}$  هزینه ثابت عقد قرارداد با تأمین‌کننده  $f$  در دوره  $t$ .

$F_{it}$  هزینه ثابت عقد قرارداد با تولیدکننده  $i$  در دوره  $t$ .

$\hat{F}_{ft}$  هزینه ثابت فسخ قرارداد با تأمین‌کننده  $f$  در دوره  $t$ .

$\hat{F}_{it}$  هزینه ثابت فسخ قرارداد با تولیدکننده  $i$  در دوره  $t$ .

$Q$  هزینه ثابت به ازای هرروز تأخیر در تحویل محصول نهایی

$M$  یک عدد دلخواه بزرگ

۳-۴- متغیرهای تصمیم

$X_{firt}$  تعداد ماده خام  $r$  فرستاده‌شده از تأمین‌کننده  $f$  به تولیدکننده  $i$  در دوره  $t$ .

$X_{ijht}$  تعداد محصول نهایی  $h$  فرستاده‌شده از تولیدکننده  $i$  به توزیع‌کننده  $j$  در دوره  $t$ .

$X_{jkht}$  تعداد محصول نهایی  $h$  فرستاده‌شده از توزیع‌کننده  $j$  به مشتری  $k$  در دوره  $t$ .

$Y_{ft}$  اگر مجموع مواد فرستاده‌شده از تأمین‌کننده  $f$  به کارخانه‌ها از  $G_f$  کم‌تر باشد، یک، در غیر این صورت صفر.

سه جزء تابع هدف (۳) کمینه کردن هزینه‌های زنجیره تأمین را برای توزیع‌کننده در نظر می‌گیرد. جزء اول شامل هزینه‌های نگهداری موجودی محصول در محل انبارهای توزیع‌کننده است. جزء دوم شامل هزینه‌های حمل‌ونقل محصولات از توزیع‌کننده‌ها به مشتریان و جزء سوم نیز هزینه‌های جریمه تأخیر در تحویل محصولات نهایی توسط توزیع‌کننده به ازای هر روز است.

محدودیت‌های مدل به شرح زیر است:

$$\sum_{i=1}^I X_{firt} \leq CS_{firt} * W_{ft} \quad \forall f, r, t \quad (4)$$

$$\sum_{j=1}^J X_{ijht} + IP_{iht} \leq CP_{iht} * W_{it} \quad \forall i, h, t \quad (5)$$

$$\sum_{k=1}^K X_{jkht} + ID_{jht} \leq CD_{jht} \quad \forall j, h, t \quad (6)$$

$$\sum_{j=1}^J X_{jkht} = D_{kht} \quad \forall k, h, t \quad (7)$$

$$CM_{rh} * \sum_{f=1}^F X_{firt} - \sum_{j=1}^J X_{ijht} \geq 0 \quad \forall i, r, h, t \quad (8)$$

$$\sum_{i=1}^I X_{ijht} - \sum_{k=1}^K X_{jkht} = 0 \quad \forall h, j, t \quad (9)$$

$$\hat{W}_{ft} \leq W_{f,t-1} \quad \forall f, t > 1 \quad (10)$$

$$\hat{W}_{it} \leq W_{i,t-1} \quad \forall i, t > 1 \quad (11)$$

$$W_{ft} \geq (W_{f,t-1}) * (1 - \hat{W}_{ft}) \quad \forall f, t > 1 \quad (12)$$

$$W_{it} \geq (W_{i,t-1}) * (1 - \hat{W}_{it}) \quad \forall i, t > 1 \quad (13)$$

$$\sum_{i=1}^I X_{firt} \leq G_f + M * (1 - Y_{ft}) \quad \forall f, r, t \quad (14)$$

$$\sum_{i=1}^I X_{firt} \geq G_f - M * (Y_{ft}) \quad \forall f, r, t \quad (15)$$

$$(1 - W_{ft}) * (1 - \hat{W}_{ft}) + \hat{W}_{ft} = Y_{ft} \quad \forall f, t \quad (16)$$

$$\sum_{j=1}^J X_{ijht} \leq G_i + M * (1 - Y_{it}) \quad \forall i, h, t \quad (17)$$

$$\sum_{j=1}^J X_{ijht} \geq G_i - M * (Y_{it}) \quad \forall i, h, t \quad (18)$$

$$(1 - W_{it}) * (1 - \hat{W}_{it}) + \hat{W}_{it} = Y_{it} \quad \forall i, t \quad (19)$$

$$W_{ft} + \hat{W}_{ft} \leq 1 \quad \forall f, t \quad (20)$$

$$W_{it} + \hat{W}_{it} \leq 1 \quad \forall i, t \quad (21)$$

تابع هدف (۱) شامل پنج جزء است که بیانگر کمینه‌کردن هزینه‌های زنجیره برای تأمین‌کننده است. جزء اول و دوم هزینه‌های عقد و فسخ قرارداد با تأمین‌کننده‌ها است. جزء سوم شامل هزینه‌های تأمین ماده خام توسط تأمین‌کننده‌ها، جزء چهارم شامل هزینه‌های حمل‌ونقل مواد خام از تأمین‌کننده‌ها به مراکز تولید و جزء پنجم نیز هزینه‌های جریمه تأخیر در تحویل محصولات نهایی توسط تأمین‌کننده به ازای هر روز است.

$$F_2 = \text{Min} \left( \sum_{i=1}^N \sum_{t=1}^P F_{it} * W_{it} * (1 - W_{i,t-1}) + \sum_{i=1}^N \sum_{t=1}^P \hat{F}_{it} * \hat{W}_{it} * W_{i,t-1} + \sum_{i=1}^I \sum_{h=1}^H \sum_{t=1}^T COP_{iht} * QP_{iht} + \sum_{i=1}^I \sum_{r=1}^R \sum_{t=1}^T CHS_{irt} * IS_{irt} + \sum_{i=1}^I \sum_{h=1}^H \sum_{t=1}^T CHP_{iht} * IP_{iht} + \sum_{i=1}^I \sum_{j=1}^J \sum_{h=1}^H \sum_{t=1}^T CTP_{ijht} * X_{ijht} + \sum_{i=1}^I \sum_{j=1}^J \sum_{h=1}^H \sum_{t=1}^T TP_{ijht} * X_{ijht} * Q \right) \quad (2)$$

تابع هدف (۲) شامل پنج جزء است و کمینه‌کردن هزینه‌های زنجیره تأمین را برای تولیدکننده در نظر می‌گیرد. جزء اول و دوم هزینه‌های عقد و فسخ قرارداد با تولیدکننده‌ها است. جزء سوم شامل هزینه‌های تولید، جزء چهارم و پنجم شامل هزینه‌های نگهداری مواد اولیه و محصول نهایی در محل انبارهای تولیدکننده است. جزء ششم نیز هزینه‌های خرید و حمل‌ونقل محصولات از تولیدکننده‌ها به مراکز توزیع را بررسی می‌کند و جزء هفتم شامل هزینه‌های جریمه تأخیر در تحویل محصولات نهایی توسط تولیدکننده به ازای هر روز است.

$$F_3 = \text{Min} \left( \sum_{j=1}^J \sum_{h=1}^H \sum_{t=1}^T CHD_{jht} * ID_{jht} + \sum_{j=1}^J \sum_{k=1}^K \sum_{h=1}^H \sum_{t=1}^T CTD_{jkht} * X_{jkht} + \sum_{j=1}^J \sum_{k=1}^K \sum_{h=1}^H \sum_{t=1}^T TD_{jkht} * X_{jkht} * Q \right) \quad (3)$$

تأمین‌کننده/ تولیدکننده در ابتدای دوره یا عقد قرارداد داریم و یا فسخ قرارداد. محدودیت (۲۲)، نشان می‌دهد که در صورت داشتن قرارداد با یک تأمین‌کننده در یک دوره باید مقدار عرضه مواد اولیه از آن تأمین‌کننده حداقل برابر با مقدار ارسال از آن تأمین‌کننده به همه تولیدکنندگان باشد. محدودیت (۲۳) مربوط به حداکثر مقدار عرضه توسط تأمین‌کنندگان فعال است. محدودیت (۲۴) بیان می‌کند که قبل از اینکه محصول  $h$  از تولیدکننده به توزیع‌کننده ارسال شود، باید راه‌اندازی و تولید آن انجام گیرد. محدودیت (۲۵) بیانگر حداکثر ظرفیت تولید محصول در هر کارخانه فعال است. محدودیت (۲۶) حداکثر ظرفیت در مراکز توزیع را نشان می‌دهد. محدودیت‌های (۲۷)، (۲۸) و (۲۹) نیز محدودیت‌های تعادلی موجودی محصول  $h$  در سطوح تأمین‌کننده‌ها، کارخانه‌ها و مراکز توزیع است؛ به‌طور نمونه در محدودیت (۲۸)، میزان موجودی در هر دوره برای محصول  $h$  و برای تولیدکننده  $i$  برابر است با میزان موجودی مازاد دوره قبل بعلاوه مقدار تولید محصول در آن دوره منهای مقادیر ارسالی از تولیدکننده  $i$  به‌تمامی توزیع‌کنندگان در دوره مربوطه است. محدودیت (۳۰)، متغیرهای غیر منفی مسئله را نشان می‌دهد و در پایان محدودیت (۳۱) متغیرهای صفر و یک را نشان می‌دهد.

#### ۴- مدل خطی مسئله

همان‌طور که دیدیم مدل ارائه شده در بخش قبلی بصورت غیرخطی بود. با توجه به این‌که معادلات دارای متغیرهای صفر و یک، رابطه غیرخطی ایجاد کرده‌اند لذا در این قسمت تمام روابط غیرخطی مدل ریاضی با استفاده از روابط (۳۲)، (۳۳) و (۳۴) به مدل خطی تبدیل می‌شوند [۲۶].

$$Z = X * Y \quad (۳۲)$$

با محدودیت‌های زیر:

$$2Z \leq X + Y \quad (۳۳)$$

$$Z \geq X + Y - 1 \quad (۳۴)$$

با استفاده از فرمول‌های بالا جزء اول و دوم توابع هدف (۱) تا (۲) و محدودیت‌های (۱۲) و (۱۳)، (۱۶) و (۱۹) به صورت زیر به حالت خطی تبدیل می‌شوند.

جزء اول تابع هدف (۱):  
(۳۵)

$$\sum_{f=1}^F \sum_{t=1}^T F_{ft} * W_{ft} * (1 - W_{f,t-1}) = \sum_{f=1}^F \sum_{t=1}^T F_{ft} * W_{it} - F_{ft} * W_{ft} * W_{f,t-1}$$

عبارت  $W_{ft} * W_{f,t-1}$  غیرخطی است لذا این حاصلضرب را  $W_1(f,t,t-1)$  می‌نامیم و تابع هدف را بصورت زیر، خطی می‌کنیم.

$$\sum_{f=1}^F \sum_{t=1}^T (F_{ft} * W_{ft} - F_{ft} * W_1(f,t,t-1)) \quad (۳۶)$$

با محدودیت‌های زیر:

$$\sum_{i=1}^I X_{firt} \leq QS_{firt} * W_{ft} \quad \forall f, r, t \quad (۲۲)$$

$$QS_{firt} \leq CSS_{firt} * WS_{firt} * W_{ft} \quad \forall f, r, t \quad (۲۳)$$

$$\sum_{j=1}^J X_{ijht} \leq M * WP_{iht} \quad \forall i, h, t \quad (۲۴)$$

$$QP_{iht} \leq CPP_{iht} * WP_{iht} * W_{it} \quad \forall i, h, t \quad (۲۵)$$

$$QD_{jht} \leq HD_{jht} \quad \forall j, h, t \quad (۲۶)$$

$$IS_{irt} = IS_{ir,t-1} + \sum_{f=1}^F X_{firt} - \sum_{h=1}^H CM_{rh} * QP_{iht} \quad \forall i, r, t > 1 \quad (۲۷)$$

$$IP_{iht} = IP_{ih,t-1} + QP_{iht} - \sum_{j=1}^J X_{ijht} \quad \forall i, h, t > 1 \quad (۲۸)$$

$$ID_{jht} = ID_{jh,t-1} + \sum_{i=1}^I X_{ijht} - \sum_{k=1}^K X_{jkht} \quad \forall j, h, t > 1 \quad (۲۹)$$

$$X_{firt}, X_{ijht}, X_{jkht}, QS_{firt}, QP_{iht}, QD_{jht}, IS_{irt}, IP_{iht}, ID_{jht} \geq 0 \quad (۳۰)$$

$$Y_{ft}, Y_{it}, W_{ft}, W_{it}, \hat{W}_{ft}, \hat{W}_{it}, WS_{firt}, WP_{iht} \in \{0,1\} \quad (۳۱)$$

$$f = 1, \dots, F, \quad 1, \dots, I, \quad j = 1, \dots, J, \quad k = 1, \dots, K \\ t = 1, \dots, T, \quad h = 1, \dots, H, \quad = 1, \dots, R$$

محدودیت (۴) بیان می‌کند که مقدار مواد خامی که از تأمین‌کننده فعال در هر دوره به تمام تولیدکننده‌ها ارسال می‌شود نباید از ظرفیت آن تأمین‌کننده بیش‌تر باشد. محدودیت (۵) همانند قبل بیان می‌کند که موجودی و تعداد محصولی که در هر دوره از هر تولیدکننده فعال به مراکز توزیع فرستاده می‌شود نباید از ظرفیت آن تولیدکننده بیش‌تر باشد؛ همچنین محدودیت (۶) این شرایط را برای توزیع‌کننده نیز در نظر می‌گیرد. محدودیت (۷) نشان می‌دهد که باید تمامی تقاضاها برآورده شود. محدودیت (۸) نمایانگر این است که برای تولید محصولات نهایی باید با توجه به ضریب مصرف مواد اولیه به‌اندازه کافی مواد اولیه داشته باشیم. در محدودیت و رابطه (۹) نشان می‌دهیم که تعداد محصولات نهایی فرستاده‌شده از تمام تولیدکنندگان باید بزرگ‌تر مساوی از تقاضای تمام انبارهای توزیع‌کننده باشد. محدودیت‌های (۱۰) و (۱۱) فسخ قرارداد با یک تأمین‌کننده و یا تولیدکننده را مبنی بر عقد قرارداد با آن‌ها در دوره، یا دوره‌های قبل می‌داند. روابط (۱۲) و (۱۳) بیان می‌کنند که عقد قرارداد با یک تأمین‌کننده و یا تولیدکننده در یک دوره وابسته به دوره‌ی قبل آن‌هاست به‌گونه‌ای که در یک دوره در صورتی با آن‌ها عقد قرارداد داریم که یا در دوره‌ی قبل با آن‌ها عقد قرارداد نداشته باشیم و یا در دوره‌ی قبل با آن‌ها فسخ قرارداد داشته باشیم. محدودیت‌های (۱۴) تا (۱۹) بیانگر این است که اگر تعداد محصولات ارسالی از یک تأمین‌کننده/ تولیدکننده در یک دوره کم‌تر از مقدار مشخصی باشد در آن دوره باید با آن تأمین‌کننده/ تولیدکننده فسخ قرارداد داشته باشیم. روابط (۲۰) و (۲۱) بیان می‌کنند که در یک دوره نمی‌توان با یک تأمین‌کننده/ تولیدکننده، هم عقد و هم فسخ قرارداد داشته باشیم. درواقع برای یک



$$W_5(f,t) \geq \hat{W}_{ft} + W_{ft} - 1$$

محدودیت ۱۳:

$$W_{it} \geq (W_{i,t-1}) * (1 - \hat{W}_{it}) \Rightarrow W_{it} \geq W_{i,t-1} - W_{i,t-1} * \hat{W}_{it}$$

$$W_{it} \geq W_{i,t-1} - W_2(i,t,t-1) \quad (45)$$

با محدودیت‌های زیر:

$$2W_2(i,t,t-1) \leq W_{i,t-1} + \hat{W}_{it} \quad (46)$$

$$W_2(i,t,t-1) \geq W_{i,t-1} + \hat{W}_{it} - 1$$

محدودیت ۱۹:

$$(1 - W_{it}) * (1 - \hat{W}_{it}) + \hat{W}_{it} = Y_{it}$$

$$\Rightarrow 1 - W_{it} - \hat{W}_{it} + W_{it} * \hat{W}_{it} + \hat{W}_{it} = Y_{it} \quad (47)$$

$$1 - W_{it} + W_5(it) = Y_{it}$$

با محدودیت‌های زیر:

$$2W_5(it) \leq \hat{W}_{it} + W_{it} \quad (48)$$

$$W_5(it) \geq \hat{W}_{it} + W_{it} - 1$$

### ۵- روش حل پیشنهادی

در مطالعه مورد نظر، برای تأمین و تولید یک محصول، چندین تأمین-کننده و تولیدکننده وجود دارد و در دوره‌های مختلف ممکن است عقد و فسخ‌های گوناگونی با تولیدکنندگان داشته باشیم. بسیاری از توزیع-کنندگان، تعداد دوره‌های تأمین متعدد دارند، تعداد بسیار تأمین-کنندگان، تولیدکنندگان و حتی تنوع توزیع‌کنندگان نیز بر پیچیدگی مسئله مورد مطالعه در این پژوهش می‌افزاید؛ چیزی که مسئله را از نظر محاسباتی سخت می‌کند و نمی‌توان با روش‌های دقیق در زمان معقول به جواب رسید.

مسائل طراحی شبکه زنجیره تأمین که پژوهش مورد نظر نمونه‌ای از آن است، به دلیل پیچیدگی‌های محاسباتی در گروه خانواده مسائل NP-hard قرار دارد. حل آن‌ها در ابعاد بزرگ، به کمک برنامه‌ریزی خطی و نرم‌افزارهای موجود امکان‌پذیر نیست یا به مدت زمان بیشتری نیاز است. توانایی حل مسائل NP-Hard در مدت زمان بسیار کم در مقایسه با روش‌های دقیق، کیفیت جواب بسیار بالا و نزدیک به بهینه و در نهایت فرار از بهینه محلی از دلایل اصلی استفاده از الگوریتم‌های فراابتکاری برای مسئله مورد نظر این پژوهش است. در این تحقیق از الگوریتم ژنتیک استفاده شده است و نتایج حاصله با الگوریتم پرش قورباغه مقایسه شده است.

#### ۵-۱- طراحی الگوریتم ژنتیک<sup>۱</sup>

الگوریتم ژنتیک روش بهینه‌سازی فراابتکاری بر مبنای سازوکار انتخاب طبیعی و زادوولد موجودات زنده، جهت یک جست‌وجوی تصادفی ولی جهت‌دار از میان فضای تصمیم‌گیری برای یافتن راه‌حل‌های بهینه جامع، استوار است. این الگوریتم بر پایه نظریه تکامل تدریجی داروین استوار است [۲۷] [۲۸].

#### ۵-۱-۱- معرفی کروموزوم

از آنجا که تعداد ۱۷ نوع متغیر تصمیم‌گیری در این مدل تعریف شده است، تنظیم ساختار کروموزوم مناسب؛ بسیار حیاتی می‌باشد. با بررسی-

$$2W_1(f,t,t-1) \leq W_{ft} + W_{f,t-1} \quad (37)$$

$$W_1(f,t,t-1) \geq W_{ft} + W_{f,t-1} - 1$$

جزء دوم تابع هدف (۱):

$$\sum_{f=1}^F \sum_{t=1}^P \hat{F}_{ft} * \hat{W}_{ft} * W_{f,t-1} \quad (38)$$

$$\sum_{f=1}^F \sum_{t=1}^P \hat{F}_{ft} * W_2(f,t,t-1)$$

با محدودیت‌های زیر:

$$2W_2(f,t,t-1) \leq \hat{W}_{ft} + W_{f,t-1} \quad (37)$$

$$W_2(f,t,t-1) \geq \hat{W}_{ft} + W_{f,t-1} - 1$$

جزء اول تابع هدف (۲):

(۳۸)

$$\sum_{i=1}^N \sum_{t=1}^P F_{it} * W_{it} * (1 - W_{i,t-1}) = \sum_{i=1}^N \sum_{t=1}^P F_{it} * W_{it} - F_{it} * W_{it} * W_{i,t-1}$$

عبارت  $W_{it} * W_{i,t-1}$  غیرخطی است لذا این حاصلضرب را  $W_1(i,t,t-1)$  می‌نامیم و تابع هدف را بصورت زیر، خطی می‌کنیم.

$$\sum_{i=1}^N \sum_{t=1}^P (F_{it} * W_{it} - F_{it} * W_1(i,t,t-1)) \quad (37)$$

با محدودیت‌های زیر:

$$2W_1(i,t,t-1) \leq W_{it} + W_{i,t-1} \quad (38)$$

$$W_1(i,t,t-1) \geq W_{it} + W_{i,t-1} - 1$$

جزء دوم تابع هدف (۲):

$$\sum_{i=1}^N \sum_{t=1}^P \hat{F}_{it} * \hat{W}_{it} * W_{i,t-1} \quad (39)$$

$$\sum_{i=1}^N \sum_{t=1}^P \hat{F}_{it} * W_2(i,t,t-1)$$

با محدودیت‌های زیر:

$$2W_2(i,t,t-1) \leq \hat{W}_{it} + W_{i,t-1} \quad (40)$$

$$W_2(i,t,t-1) \geq \hat{W}_{it} + W_{i,t-1} - 1$$

محدودیت‌های (۱۲) و (۱۳)، (۱۶) و (۱۹) به صورت زیر به حالت خطی تبدیل می‌شوند.

محدودیت ۱۲:

$$W_{ft} \geq (W_{f,t-1}) * (1 - \hat{W}_{ft}) \Rightarrow W_{ft} \geq W_{f,t-1} - W_{f,t-1} * \hat{W}_{ft}$$

$$W_{ft} \geq W_{f,t-1} - W_2(f,t,t-1) \quad (41)$$

با محدودیت‌های زیر:

$$2W_2(f,t,t-1) \leq W_{f,t-1} + \hat{W}_{ft} \quad (42)$$

$$W_2(f,t,t-1) \geq W_{f,t-1} + \hat{W}_{ft} - 1$$

محدودیت ۱۶:

$$(1 - W_{ft}) * (1 - \hat{W}_{ft}) + \hat{W}_{ft} = f_{it}$$

$$\Rightarrow 1 - W_{ft} - \hat{W}_{ft} + W_{ft} * \hat{W}_{ft} + \hat{W}_{ft} = Y_{ft} \quad (43)$$

$$1 - W_{ft} + W_5(f,t) = Y_{ft}$$

با محدودیت‌های زیر:

$$2W_5(f,t) \leq \hat{W}_{ft} + W_{ft} \quad (44)$$

1- Genetic Algorithms



نمایش ماتریسی است که از حاصل ضرب ماتریس تقاضا برای هر کالا در ماتریس درصد تأمین تقاضای نقاط برای کالاهای مختلف بدست می‌آید. از آنجا که شبکه زنجیره تأمین مورد بررسی سه لایه‌ای است، سه ماتریس از اعداد تصادفی بین صفر و یک به ابعاد  $J \times K \times H \times T$  و  $I \times J \times H \times T$  و  $F \times I \times R \times T$  که  $F, I, R, H, K, J, I$  به ترتیب تعداد تأمین‌کننده، تولیدکننده، توزیع‌کننده، مشتریان، محصول، مواد اولیه و دوره‌ها است، تولید می‌شود. سپس با ضرب کردن ظرفیت هر یک از مقاصد در سهم مربوط به خود از هر منبع در هر مرحله، یک جواب اولیه برای مسأله تولید می‌شود. نحوه نمایش میزان کالاهای اختصاص یافته به هر نقطه‌ی توزیع، از مینیمم ظرفیت آن توزیع‌کننده منهای سطح موجودی آن توزیع‌کننده برای کالاهای مختلف در تمام دوره‌ها و حاصل ضرب مجموع تمام کالاهایی که از هر توزیع‌کننده به مشتریان فرستاده می‌شود، بدست می‌آید. میزان کالاهای اختصاص یافته به هر مرکز تولید، از مینیمم ظرفیت آن تولیدکننده منهای سطح موجودی آن تولیدکننده برای کالاهای مختلف در تمام دوره‌ها و حاصل ضرب مجموع تمام کالاهایی که از هر تولیدکننده به توزیع‌کننده فرستاده می‌شود، بدست می‌آید.

#### ۵-۱-۳- عملگرهای ژنتیک

##### - عملگر تقاطع

در این تحقیق با توجه به اینکه کروموزوم‌های ارائه شده از نوع پیوسته هستند لذا از عملگر تقاطع محاسباتی<sup>۱</sup> که برای فضاهای پیوسته مناسب است، استفاده می‌شود. این عملگر برای دو والد  $X_1$  و  $X_2$  یک جفت فرزند کاندید بصورت زیر تعیین می‌کند.

$$\begin{aligned} Y_1 &= a * X_1 + (1 - a) * X_2 \\ Y_2 &= a * X_2 + (1 - a) * X_1 \\ \alpha &= (\alpha_1, \alpha_2, \alpha_3, \dots, \alpha_n) \end{aligned} \quad , \quad 0 \leq \alpha \leq 1 \quad (49)$$

$\alpha$  برداری است که از متغیرهای تصادفی از بازه  $[0,1]$  بصورت یکنواخت گرفته شده است.

##### - عملگر جهش

برای کروموزوم‌های پیوسته‌ی ارائه شده در این تحقیق از جهش غیر یکنواخت<sup>۲</sup> استفاده شده است. در این جهش یک مقدار کوچک به مقدار فعلی ژن اضافه می‌شود. مقدار اضافه شده بطور تصادفی از یک توزیع گوسی با میانگین صفر و انحراف معیار معلوم بدست می‌آید. برای والدی مانند  $h$  و فرزند جهش‌یافته  $k$  روابط زیر برقرار است.

$$\begin{aligned} \Delta x &\sim N(0, \delta^2) \\ k &= h + \Delta h \sim N(0, \delta^2) \\ k &= h + \delta N(0, 1) \end{aligned} \quad (50)$$

در معادله اخیر یک عدد نرمال استاندارد تولید می‌کنیم و سپس آنرا در  $\delta$  ضرب و به مقدار  $h$  اضافه می‌کنیم.

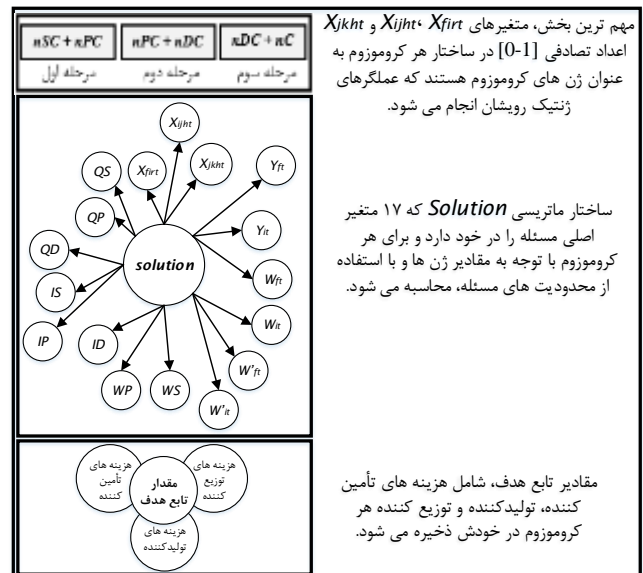
#### ۵-۲- طراحی الگوریتم پرش قورباغه<sup>۳</sup>

الگوریتم پرش قورباغه آمیخته برای اولین بار در سال ۲۰۰۳ توسط یوسف و لانسلی ایجاد شد. این الگوریتم مشابه GA و PSO یک الگوریتم

های انجام شده این نتیجه حاصل شد که قرارداد تمامی این ۱۷ نوع متغیر در ساختار کروموزوم، کار صحیحی نیست و عملاً الگوریتم فراابتکاری ژنتیک (و هر الگوریتم فراابتکاری دیگر) را غیرکارا می‌کند. پس از بررسی‌های فراوان تصمیم گرفته شد که ۳ متغیر  $X_{ijht}$ ،  $X_{firt}$  و  $X_{jkht}$  را به عنوان متغیرهای موجود در کروموزوم انتخاب شود و ۱۴ متغیر دیگر با توجه به ۲۶ محدودیت موجود در مسئله، محاسبه شوند. بنابراین، ۳ متغیر  $X_{firt}$ ،  $X_{ijht}$  و  $X_{jkht}$  به عنوان «ژن» در هر کروموزوم ذخیره خواهند شد.

در تحقیق حاضر، هر کروموزوم (جواب) شامل سه بخش است که مربوط به فرآیند روبه‌جلو در شبکه است. بخش اول که شامل  $nSC + nPC$  ژن است، مربوط به جریان بین مراکز تأمین و تولید است. بخش دوم که شامل  $nPC + nDC$  ژن است، نشان‌دهنده جریان بین مراکز تولید و توزیع است. بخش سوم کروموزوم با تعداد  $nDC + nC$  ژن تعیین‌کننده میزان جریان بین مراکز توزیع و مشتریان سیستم است.

برای عمومیت داشتن الگوریتم ژنتیک؛ استفاده کردن از متغیرهای  $X_{firt}$ ،  $X_{ijht}$  و  $X_{jkht}$  به صورت مستقیم؛ اصلاً قابل قبول نیست. زیرا مقادیر ماتریس‌های این متغیرها، برای هر مسئله تفاوت می‌کند و این تفاوت باعث می‌شود که برای هر مسئله به عملگرهای جهش و تقاطع مخصوص به آن مسئله نیاز باشد. به همین دلیل در طراحی کروموزوم‌ها،  $X_{firt}$ ،  $X_{ijht}$  و  $X_{jkht}$  به عنوان متغیرهایی با اعداد تصادفی در دامنه  $[0 - 1]$  در نظر گرفته می‌شوند به طوری که سهمی از تقاضای  $D$  را برای هر لایه از زنجیره تأمین را نشان می‌دهند. لذا با توجه به مطالب بیان‌شده، ساختار کروموزوم در الگوریتم ژنتیک به صورت شکل (۲) می‌باشد.



شکل (۲): نمایش کروموزوم

#### ۵-۱-۲- تولید جواب اولیه

نحوه نمایش، میزان کالاهای تحویل داده شده به هر نقطه تقاضا بصورت

1- Arithmetic Crossover  
2- Non Uniform Mutation  
3- Frog Leaping Algorithms

قرار می‌گیرد.

### ۵-۳- تنظیم پارامترهای فراابتکاری

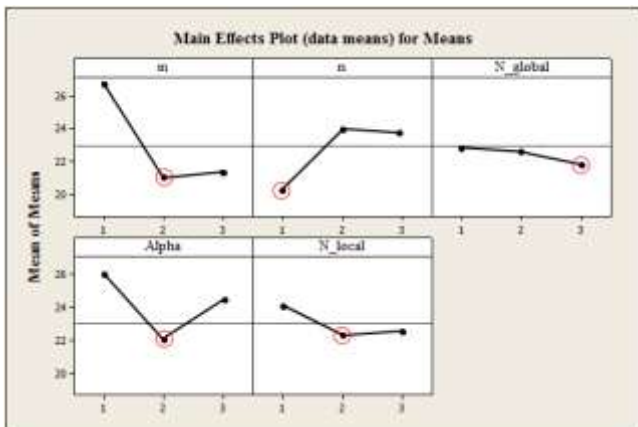
در این تحقیق، در الگوریتم ژنتیک برای چهار پارامتر نرخ تقاطع، جهش، اندازه جمعیت نسل‌ها و تعداد تکرارها و در الگوریتم پرش قورباغه (SFLA) برای سه پارامتر تکرار جستجوی سراسری، تعداد ممپلکس‌ها، اندازه ممپلکس‌ها و دو پارامتر کنترلی الگوریتم FLA شامل تعداد تکرار حلقه داخلی و تعداد تکرار حلقه خارجی تنظیم پارامتر با استفاده از روش تاگوچی صورت می‌گیرد.

لازم به ذکر است که برای به دست آوردن تعداد جمعیتی که در هر تکرار الگوریتم درونی FLA لازم است از طریق زیر به دست می‌آید.

$$q = \max(\text{round}(0.5 * \text{اندازه مپلکس}), 2) \quad (53)$$

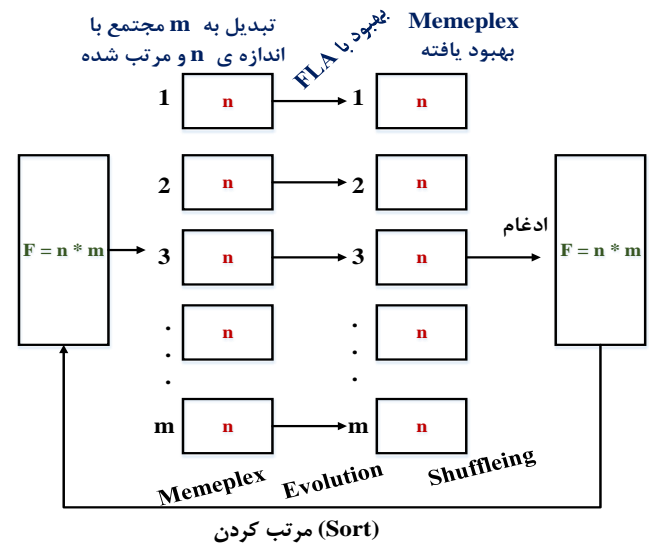
برای تعیین عملکرد پارامترهای یک الگوریتم فراابتکاری از دو نمودار میانگین پاسخ‌ها<sup>۱</sup> و نمودار استواری جواب‌ها (نسبت سیگنال اغتشاشات)<sup>۲</sup> استفاده می‌شود که در اغلب موارد این دو نمودار نتایج یکسانی را ارائه می‌دهند.

در اکثر تحقیقات و مراجع، اولویت اول برای تنظیم پارامترهای الگوریتم‌ها، استفاده از نمودار  $S/N$  می‌باشد. برای تولید این نمودارها با توجه به اینکه مدل مورد بررسی مینی‌میزاسی است، از نسبت کوچک‌تر - بهتر استفاده شده است. در نمودار (۲) و (۴) هر چه مقدار میانگین بدست آمده برای پارامترها بیشتر باشد، مقدار آن پارامتر به بهترین مقدار خود نزدیک‌تر است و جواب‌های بهتری در اجرای الگوریتم ارائه می‌دهد؛ اما در نمودار (۱) و (۳) که منصوب به نمودار میانگین پاسخ‌هاست برای یک پارامتر، جواب ایده‌آل، کمترین مقدار میانگین‌ها است. نمودارهای (۱) تا (۴) و همچنین جداول (۱) و (۲) نتایج روش تاگوچی جهت تنظیم پارامترهای دو الگوریتم مذکور را نشان می‌دهد.



شکل (۴): میانگین جواب‌ها حاصل از نرم‌افزار مینی‌تب برای تنظیم پارامترهای SFLA

بهینه‌سازی مبتنی بر جمعیت است که می‌توان آن را برای حل مسائل بهینه‌سازی پیچیده استفاده کرد. مهم‌ترین مزیت SFLA سرعت همگرایی بالای آن است. شکل (۳) مراحل الگوریتم پرش قورباغه را نشان می‌دهد [۲۹].



شکل (۳): فلوچارت مراحل الگوریتم SFLA

### ۵-۲-۱- تولید جواب اولیه

نحوه تولید جواب اولیه در الگوریتم پرش قورباغه همانند الگوریتم ژنتیک است که در قسمت قبل توضیح داده شد.

### ۵-۲-۲- تولید جواب‌های جدید

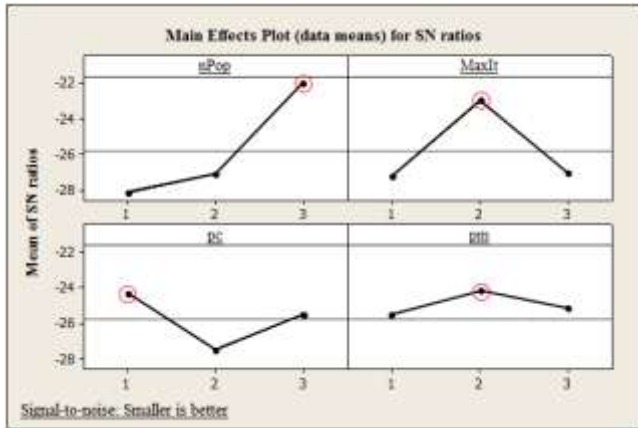
بعد از این که جواب‌های اولیه الگوریتم پرش قورباغه با استفاده از روش ارائه‌شده، تولید شدند و جواب‌ها ارزیابی شدند، نوبت به تولید جواب‌های نسل بعد می‌رسد. نحوه تولید جواب‌های جدید در الگوریتم SFLA به این‌گونه است که اگر جواب  $i$  جواب  $j$  را مغلوب کرد، آنگاه جواب  $i$  به‌عنوان یک جواب بهتر شناخته‌شده (موقعیت بهترین قورباغه  $(P_B)$ ) و جواب  $j$  (موقعیت بدترین قورباغه  $(P_W)$ ) به سمت جواب  $i$  با استفاده از معادله (۳۴) و (۳۵) حرکت می‌کند، ولی به‌طور کامل به محل آن نمی‌رسد. دلیل آن هم وجود مقدار گامی است که هر قورباغه پس از پرش طی می‌کند.

$$X_q^{new} = p_w + S \quad (34) \quad (51)$$

$$S = rand * c * (p_B - p_w) \quad (52)$$

چنانچه با این تغییر بهبودی در میزان توابع هدف نسبت به حالت قبلی حاصل نگردد، دوباره محاسبات با استفاده از معادلات فوق انجام می‌گیرد، با این تفاوت که از  $P_x$  (موقعیت بهترین قورباغه در کل جمعیت) به جای  $P_B$  استفاده می‌شود. اگر دوباره بهبودی در میزان تابع هدف حاصل نشود، قورباغه جدیدی به‌طور تصادفی تولیدشده و بجای بدترین حالت

1- Mean of Means  
2- Signal to noise ratio (S/N ratios)



شکل (۷): میانگین نسبت اغتشاشات حاصل از نرم‌افزار مینی‌تب برای تنظیم پارامترهای GA

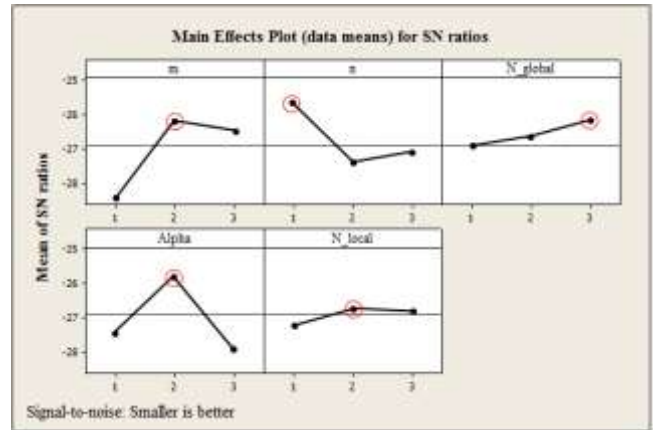
جدول (۲): پارامترهای کنترلی الگوریتم GA و سطوح آن

سطوح			جمعیت	تعداد تکرار	احتمال تقاطع	احتمال جهش	GA
۳	۲	۱					
۱۰۰	۵۰	۲۰					
۴۰۰	۷۰۰	۱۰۰۰					
۰,۸	۰,۷	۰,۸					
۰,۲	۰,۲	۰,۳					

در GA تعداد تکرار ۷۰۰، تعداد جمعیت هر نسل ۱۰۰، احتمال تقاطع ۰,۸ و احتمال جهش ۰,۳ است. همین‌طور برای پرش قورباغه و الگوریتم درونی آن تعداد ممپلکس‌ها ۸، جمعیت هر ممپلکس ۵، تعداد جستجوی سراسری ۵۰، تکرار حلقه داخلی ۴ و تعداد تکرار حلقه خارجی ۲ است.

#### ۶- نتایج محاسباتی

به‌منظور حل مدل و اعتبارسنجی آن، دو الگوریتم فراابتکاری شامل الگوریتم بهینه‌سازی ژنتیک و پرش قورباغه ارائه شده است. در این بخش نتایج به‌دست‌آمده از پیاده‌سازی روش‌های حل پیشنهادی بر روی مسائل طراحی شده مورد بررسی قرار گرفته است. آزمایش‌ها بر روی ۱۰ مسئله در سه دسته کوچک، متوسط و بزرگ اجرا شده است (جدول ۳). به‌منظور پیاده‌سازی مسائل، پارامترهای ورودی در جدول (۴) نشان داده شده است. پارامتر الگوریتم‌های فراابتکاری مطابق جدول (۱) و (۲) است. الگوریتم‌های موردنظر در نرم‌افزار MATLAB version 8.1.0.604 (R2013a) کدنویسی و بر روی یک لپ‌تاپ با پردازنده چهار هسته Intel Core i7-3632QM 2.2GHz و ۴ گیگابایت حافظه اجرا شد.



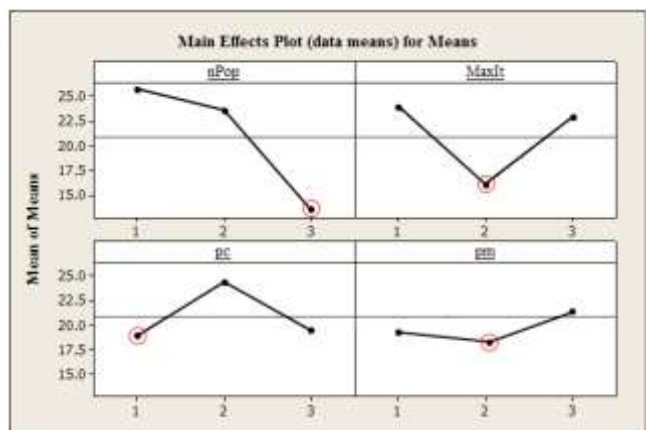
شکل (۵): میانگین نسبت اغتشاشات حاصل از نرم‌افزار مینی‌تب برای تنظیم پارامترهای SFLA

جدول (۱): پارامترهای کنترلی الگوریتم SFLA و سطوح آن

سطوح			تعداد ممپلکس‌ها (m)	جمعیت هر ممپلکس (n)	جستجوی سراسری	تکرار حلقه داخلی	تکرار حلقه خارجی	SFLA
۳	۲	۱						
۱۰	۸	۹						
۸	۷	۵						
۵۰	۷۰	۱۰۰						
۴	۴	۵						
۴	۲	۳						

$F = m * n$  (جمعیت کل قورباغه‌ها)

و این مقادیر برای الگوریتم ژنتیک بصورت زیر است.



شکل (۶): میانگین جواب‌ها حاصل از نرم‌افزار مینی‌تب برای تنظیم پارامترهای GA

جدول (۳): پارامترهای ورودی به منظور پیاده‌سازی مسائل

شماره مسئله	۱	۲	۳	۴	۵	۶	۷	۸	۹	۱۰
تأمین‌کننده	۲	۳	۴	۵	۵	۵	۵	۵	۵	۵
تولیدکننده	۲	۲	۴	۴	۵	۶	۶	۷	۶	۷
توزیع‌کننده	۱	۳	۵	۶	۶	۶	۷	۸	۶	۸
مشتری	۳	۴	۶	۶	۷	۷	۷	۸	۸	۹
محصول	۲	۳	۳	۳	۳	۳	۳	۳	۴	۴
ماده اولیه	۲	۳	۲	۲	۲	۲	۲	۳	۳	۳
دوره	۲	۳	۲	۲	۲	۳	۳	۳	۳	۳

قبل از اقدام به حل مسائل با ابعاد بزرگ، لازم است از کارایی حل مسائل با اندازه کوچک و متوسط توسط الگوریتم‌های ژنتیک و پرش قورباغه اطمینان حاصل گردد. برای این منظور، مسائل با اندازه کوچک و متوسط توسط الگوریتم‌های معرفی‌شده و نرم‌افزار GAMS 24.1.3/CPLEX حل شده و میزان انحراف (%D) هر یک محاسبه شده است. عملکرد نسبی الگوریتم‌ها در حل مسائل کوچک و متوسط در مقایسه با حل دقیق در دو محور بهینگی و زمان حل در جدول (۵) آورده شده است. لازم به ذکر است در این پژوهش، مسائلی که زمان حل آن‌ها کمتر از ۱۰۰۰ ثانیه است، در حوزه مسائل کوچک و مسائل با زمان حل بین ۱۰۰۰ تا ۱۵۰۰ ثانیه، متوسط و مسائل بزرگ زمان حل بالای ۱۵۰۰ ثانیه را شامل می‌شود.

جدول (۴): ابعاد مسائل طراحی شده

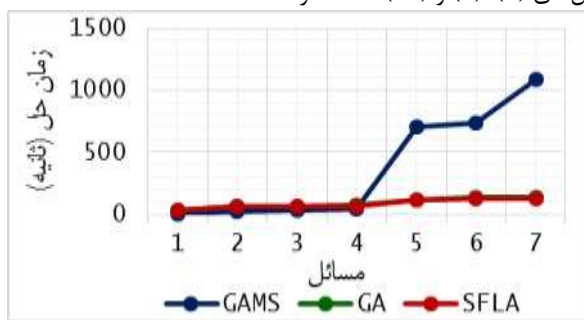
پارامتر	تابع توزیع	پارامتر	تابع توزیع
$G_f$	$U[10,100]$	$HD_{jkt}$	$U[90,100]$
$G_i$	$U[10,100]$	$CTS_{jkt}$	$U[10,15]$
$D_{kkt}$	$U[1,10]$	$CTP_{jkt}$	$U[15,20]$
$CM_{k,t}$	$U[1,3]$	$CTD_{jkt}$	$U[20,25]$
$COS_{jkt}$	$U[10,15]$	$TS_{jkt}$	$U[0,3]$
$COP_{jkt}$	$U[15,20]$	$TP_{jkt}$	$U[0,6]$
$CHS_{jkt}$	$U[10,15]$	$TD_{jkt}$	$U[0,9]$
$CHP_{jkt}$	$U[5,10]$	$F_{jt}$	$U[5,10]$
$CHD_{jkt}$	$U[1,5]$	$F_{kt}$	$U[5,10]$
$CSS_{jkt}$	$U[20,430,20,450]$	$F_{jt}$	$U[1,5]$
$CPP_{jkt}$	$U[1220,1240]$	$F_{kt}$	$U[1,5]$
$CS_{jkt}$	$U[20,420,20,430]$	$CD_{jkt}$	$U[185,90]$
$CP_{jkt}$	$U[1210,1220]$		

جدول (۵): نتایج حل مسائل نمونه با اندازه متوسط توسط الگوریتم‌های فراابتکاری و مقایسه آن با نتایج حل دقیق

اندازه مسئله	شماره مسئله	GAMS		GA		مقایسه		SFLA		مقایسه	
		زمان (ثانیه)	تابع هدف	زمان (ثانیه)	تابع هدف	$\frac{GA}{SFLA}$	$\frac{GA - SFLA}{SFLA}$	زمان (ثانیه)	تابع هدف	$\frac{SFLA}{GAMS}$	$\frac{SFLA - GAMS}{GAMS}$
مسائل کوچک	۱	۱۹۹۵۰۰	۹/۳۰۲	۳۵/۰۰	۲۰۰۷۲۸	۳/۷۶	۰/۰۰۶	۱۹۹۸۱۲	۳۰/۷۶	۲/۳۱	۰/۰۰۲
	۲	۳۴۴۱۸۸	۲۷/۲۳۱	۷۰/۱۸۵	۳۴۴۹۷۱	۲/۶۰	۰/۰۰۵	۳۴۴۹۴۱	۶۵/۲۱	۲/۳۹	۰/۰۰۲
	۳	۲۸۳۱۰۵	۳۰/۴۶۴	۷۰/۹۷	۲۸۴۹۱۳	۲/۳۳	۰/۰۰۶	۲۸۳۳۱۴	۶۵/۴۳	۲/۱۵	۰/۰۰۱
	۴	۳۱۶۷۳۵	۴۹/۹۱۲	۷۵/۵۴	۳۱۷۸۱۵	۱/۵۱	۰/۰۰۳	۳۱۷۴۰۱	۶۹/۱۱	۱/۳۸	۰/۰۰۲
	Min	۲۸۳۱۰۵	۹/۳۰۲	۳۵	۲۰۰۷۲۸	۱/۵۱	۰/۰۰۳	۱۹۹۸۱۲	۳۰/۷۶	۱/۳۸	۰/۰۰۱

۱/۱۰	۰/۰۰۴	۲/۳۱	۰/۰۰۲	۵۷/۶۳	۲۸۶۱۱۷	۲/۵۵	۰/۰۰۵	۶۳/۹	۲۸۷۱۰۷	۲۹/۲۲۷	۲۳۵۷۵۷	Mean
۱/۱۴	۰/۰۰۶	۳/۳۱	۰/۰۰۲	۶۹/۱۱	۳۴۳۹۴۱	۳/۷۶	۰/۰۰۶	۷۵/۵۴	۳۴۴۹۷۱	۴۹/۹۱۲	۳۴۳۱۸۸	Max
۱/۰۶	۰/۰۰۰	۰/۱۶	۰/۰۰۲	۱۱۳/۹۲	۵۴۹۸۲۱	۰/۱۷	۰/۰۰۹	۱۲۰/۵	۵۵۳۹۰۱	۷۰۷/۰۱	۵۴۸۷۹۷	۵
۱/۰۶	۰/۰۰۰	۰/۱۷	۰/۰۰۴	۱۲۷/۰۱	۵۵۶۰۱۰	۰/۱۸	۰/۰۰۴	۱۳۵/۰۵	۵۵۶۰۹۷	۷۴۱/۲۱	۵۵۳۹۳۵	۶
۱/۰۶	۰/۰۰۴	۰/۱۲	۰/۰۰۶	۱۳۰/۵۹	۶۲۲۸۲۱	۰/۱۳	۰/۰۱۰	۱۳۸/۸۲	۶۲۵۱۷۸	۱۰۹۲/۷۳	۶۱۹۲۰۶	۷
۱/۰۶	۰/۰۰۰	۰/۱۲	۰/۰۰۲	۱۱۳/۹۲	۵۴۹۸۲۱	۰/۱۳	۰/۰۰۴	۱۲۰/۵۰	۵۵۳۹۰۱	۷۰۷/۰۱	۵۴۸۷۹۷	Min
۱/۰۶	۰/۰۰۱	۰/۱۵	۰/۰۰۴	۱۲۳/۸۴	۵۷۶۲۱۷	۰/۱۶	۰/۰۰۸	۱۳۱/۴۶	۵۷۷۰۵۹	۸۴۶/۹۸	۵۷۳۹۷۹	Mean
۱/۰۶	۰/۰۰۴	۰/۱۷	۰/۰۰۶	۱۳۰/۵۹	۶۲۲۸۲۱	۰/۱۸	۰/۰۱۰	۱۳۸/۸۲	۶۲۵۱۷۸	۱۰۹۲/۷۳	۶۱۹۲۰۶	Max
۱/۰۶	۰/۰۰۲	-	-	۱۶۹/۸۲	۷۵۳۱۴۲	-	-	۱۷۹/۳۳	۷۵۴۷۶۵	-	-	۸
۱/۰۷	۰/۰۰۳	-	-	۱۷۹/۱۱	۸۹۵۱۷۲	-	-	۱۹۲/۰۲	۸۹۸۲۳۶	-	-	۹
۱/۰۶	۰/۰۰۲	-	-	۲۰۹/۷۷	۱۱۰۷۳۴۸	-	-	۲۲۳/۰۶	۱۱۰۹۳۵۴	-	-	۱۰
۱/۰۶	۰/۰۰۲	-	-	۱۶۹/۸۲	۷۵۳۱۴۲	-	-	۱۷۹/۳۳	۷۵۴۷۶۵	-	-	Min
۱/۰۶	۰/۰۰۲	-	-	۱۸۶/۲۳	۹۱۸۵۵۴	-	-	۱۹۸/۱۴	۹۲۰۷۸۵	-	-	Mean
۱/۰۷	۰/۰۰۳	-	-	۲۰۹/۷۷	۱۱۰۷۳۴۸	-	-	۲۲۳/۰۶	۱۱۰۹۳۵۴	-	-	Max

کنند. نتایج جدول (۵) برای مسائل در ابعاد بزرگ نشان می‌دهد که نرم-افزار گمز برای رسیدن به یک جواب موضعی قابل قبول متوقف شده است، دلیل توقف فرآیند حل نرم‌افزار دقیق در مورد مسائل ۸، ۹ و ۱۰، ازدیاد زمان اجرا از حد زمانی تعیین شده (۱۵۰۰) ثانیه است. این در حالی است که برای این سه مسئله نمونه، الگوریتم GA و SFLA توانسته‌اند در زمانی قابل قبول به همگرایی برسند. برای مقایسه آسان‌تر عملکرد سه روش ارائه شده در حل مسائل نمونه با اندازه کوچک و متوسط می‌توان از شکل‌های (۸)، (۹) و (۱۰) کمک گرفت.



شکل (۸): مقایسه زمان حل مسائل با روش فراابتکاری و دقیق

در شکل (۴) زمان رسیدن به جواب برای هفت مسئله ابتدایی توسط نرم-افزار گمز و الگوریتم‌های ژنتیک و پرش قورباغه را نشان داده شده است. نتایج حاکی از آن است که با افزایش ابعاد مسئله، زمان حل دقیق به صورت نمایی افزایش می‌یابد، این تغییرات برای فراابتکاری‌های مذکور روند منظمی را طی می‌کند.

روند صعودی فاصله از بهینگی نسبی جواب‌های به دست آمده (Meta-GAMS) و زمان حل (Meta-GAMS) برای مسائل کوچک و متوسط از شکل (۸) و (۹) قابل مشاهده است.

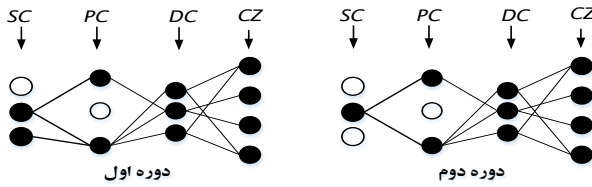
با توجه به ردیف Mean، الگوریتم ژنتیک در حل مسائل کوچک به طور میانگین ۰/۵ درصد از بهینگی فاصله دارد که در ۲۵۵ درصد از زمان حل دقیق به این نتایج رسیده است. در الگوریتم پرش قورباغه، فاصله از بهینگی ۰/۲ درصد در ۲۳۱ درصد زمان حل دقیق است. همچنین میانگین اختلاف جواب الگوریتم ژنتیک نسبت به پرش قورباغه ۰/۴ درصد و زمان حل آن نسبت به پرش قورباغه ۱۱۰ درصد حاصل شده است.

در حل مسائل متوسط با توجه به ردیف Mean، مشاهده می‌گردد که الگوریتم فراابتکاری GA توانسته است به طور میانگین به حدود ۰/۸ درصد فاصله از بهینگی در تنها ۱۶ درصد از زمان حل دقیق دست یابد. با اندکی تأمل متوجه کاهش ۲۳۹ درصد در میانگین زمان حل نسبی الگوریتم GA در مقایسه با حل دقیق در ازای افزایش ۰/۳ درصد در فاصله از میانگین بهینگی نسبی جواب‌های این دو الگوریتم، در نتیجه افزایش ابعاد مسائل از اندازه کوچک تا متوسط می‌شویم.

با توجه به ردیف Mean، الگوریتم SFLA توانسته است در حل مسائل متوسط به طور میانگین به حدود ۰/۴ درصد فاصله از بهینگی در تنها ۱۵ درصد از زمان حل دقیق دست یابد. در این قسمت نیز متوجه کاهش ۲۱۶ درصد در میانگین زمان حل نسبی الگوریتم SFLA در مقایسه با حل دقیق در ازای افزایش ۰/۲ درصد در فاصله از میانگین بهینگی نسبی جواب‌های این دو الگوریتم، در نتیجه افزایش ابعاد مسائل از اندازه کوچک تا متوسط می‌شویم. همچنین میانگین اختلاف جواب الگوریتم ژنتیک نسبت به پرش قورباغه در حل این مسائل ۰/۱ درصد و زمان حل آن نسبت به پرش قورباغه ۱۰۶ درصد حاصل شده است. نتایج حاصل از مقایسه دو فراابتکاری باهم نشان می‌دهد که هر دو الگوریتم تقریباً روند منظمی در زمان حل برای رسیدن به یک جواب قابل قبول سپری می-



تأمین‌کننده ۳، کاهش داده شده است. نتایج نشان داد که مدل در دوره دوم با تأمین‌کننده ۳ فسخ قرارداد کرده و تنها با تأمین‌کننده ۲ قرارداد دارد. شکل (۱۲) تأثیر میزان ظرفیت بر روی عقد و فسخ قراردادها را نشان می‌دهد.

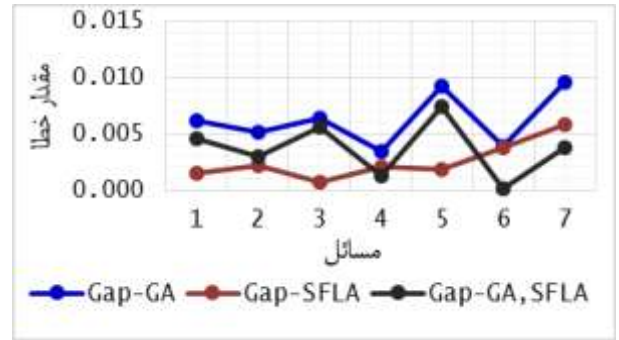


شکل (۱۲): زنجیره تأمین با تغییر میزان ظرفیت تأمین‌کنندگان

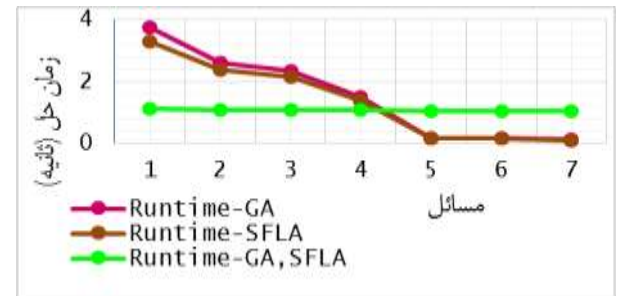
در واقع با توجه به محدودیت‌های ۱۴ و ۱۵ باید تعداد مواد خامی که از یک تأمین‌کننده گرفته می‌شود از مقدار خاصی کم‌تر نباشد در نتیجه با توجه به کاهش ظرفیت تأمین‌کننده ۳ مجبور به فسخ قرارداد با آن تأمین‌کننده هستیم و از آنجایی که ظرفیت تأمین‌کننده ۱ در دوره دوم به اندازه کافی است تنها با آن تأمین‌کننده در دوره دوم قرارداد می‌بندیم.

#### ۸- نتیجه‌گیری

در این پژوهش، یک مدل یکپارچه ریاضی برای برنامه‌ریزی، تأمین، تولید و توزیع در طراحی یک شبکه زنجیره تأمین ناب باهدف حداقل سازی هزینه‌های زنجیره ارائه شده است. در مدل پیشنهادی سطح موجودی و میزان عقد و فسخ قراردادها برای دو سطح تأمین‌کننده و تولیدکننده در نظر گرفته شده است. برای اعتبارسنجی مدل و حل مسائل با ابعاد کوچک با آن نرم‌افزار GAMS استفاده شده است. به دلیل NP-hard بودن مسائل در ابعاد بزرگ و با ارجاع به روش‌های حل مشابه، الگوریتم‌های فراابتکاری GA و SFLA در کنار حل دقیق استفاده شد. با توجه به نتایج جدول (۵) می‌توان گفت که نرم‌افزار گمز قادر به ارائه جواب بهینه برای مسائل با اندازه کوچک با صرف زمان مناسب است؛ اما با افزایش ابعاد مسئله، زمان حل گمز به صورت نمایی افزایش می‌یابد، درحالی‌که الگوریتم ژنتیک و پرش قورباغه، قادر به حل مسئله در زمان قابل قبول هستند. با تحلیل‌های انجام گرفته و با افزایش پیچیدگی مسائل و همچنین مقایسه‌های انجام شده، الگوریتم پرش قورباغه، الگوریتم کارا تر تعیین شده است. در زمینه تحقیقات آتی می‌توان مدل‌سازی مسئله را به صورت ترکیبی فازی احتمالی در نظر گرفت، اضافه کردن متغیرهای کمبود به مسئله، عقد و فسخ قرارداد با توزیع‌کنندگان و در نظر گرفتن معیارهای زیست‌محیطی و شاخص‌های اجتماعی در تشکیل اهداف به منظور انطباق با شرایط واقعی از دیگر پیشنهادها آتی در این زمینه است. این نوع پژوهش‌ها برای سازمان‌های لجستیکی که در زمینه محصولات و اقلام خدماتی فعالیت می‌کنند، مناسب است. بنابراین این سازمان‌ها می‌توانند در هنگام قرارداد با سایر شرکت‌های تولیدی و تأمین‌کننده جهت تأمین محصول مورد نیاز خود، راهکارها و سیاست‌های مدیریتی مناسبی را برای انتخاب شبکه زنجیره تأمین خود با توجه به تأمین‌کنندگان و تولیدکنندگان فعال اتخاذ نمایند. در این صورت با مدیریت



شکل (۹): روند بهینگی نسبی جواب‌های به دست آمده

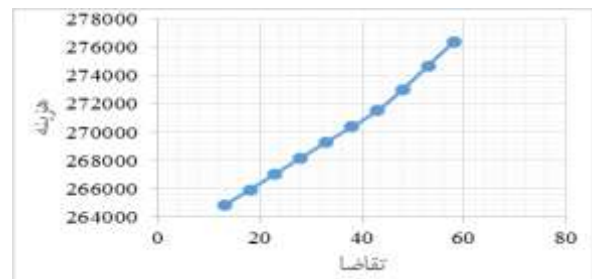


شکل (۱۰): روند بهینگی نسبی زمان حل

با توجه به جدول (۵) و شکل‌های (۸)، (۹) و (۱۰)، کارایی بهتر، دقت و سرعت همگرایی الگوریتم SFLA در مقابل الگوریتم GA هنگام افزایش ابعاد مسئله کاملاً محسوس است.

#### ۷- تحلیل حساسیت

در این بخش تحلیل حساسیت در دو حالت تأثیر افزایش پارامتر تقاضا و ظرفیت مراکز تأمین و تولید بر روی تابع هدف و عقد و فسخ قراردادها مورد بررسی قرار گرفته و نتایج مربوط به هر کدام به صورت شماتیک نمایش داده شده است. شکل (۱۱) روند صعودی افزایش هزینه‌ها را نسبت به افزایش تقاضای مشتری یک برای محصول نوع سه در دوره اول و برای ده تکرار را نشان می‌دهد.



شکل (۱۱): حساسیت تابع هدف مدل نسبت به افزایش تقاضا

در بخش دوم تحلیل حساسیت، رفتار مدل به ازای تغییر ظرفیت مراکز تأمین و تولید و میزان عقد و فسخ قراردادها مورد بررسی قرار گرفته است. در دوره دوم میزان ظرفیت تأمین‌کننده ۲، افزایش و میزان ظرفیت

**Supply Chain Network Based on Lean, Agile and Pivotal values and Solving by Multi Objective Metaheuristic Algorithms.** Journal of Industrial Engineering (JIENG), vol. 52, no. 3, pp. 349-351

- [14] Zegordi, S. H., and Marandi, F. (Summer 2017). **Integrated Production Scheduling in Dairy Products with Improved Particle Swarm Optimization.** Journal of Transportation Engineering, vol. 8, no. 4, pp. 545-565.
- [15] Chen, C. L., and Lee, W. C. (2004). **Multi-objective Optimization of Multi-Echelon Supply Chain Networks With Uncertain Product Demands and Prices.** Computers & Chemical Engineering, vol. 28, no. 6, pp. 1131-1144.
- [16] Syarif, A., Yun, Y., and Gen, M. (2002). **Study on Multi-Stage Logistic Chain Network: a Spanning Tree-Based Genetic Algorithm Approach.** Computers & Industrial Engineering, vol. 43, no. 1, pp. 299-314
- [17] Cheng, B, et al. (August 2019). **Integrated Optimization of Material Supplying, Manufacturing, and Product Distribution: Models and fast algorithms.** European Journal of Operational Research, vol. 227, no. 1, pp. 100-111
- [18] Pourrousta, A., Tavakkoli - Moghaddam, R., and Ebrahimnejad, S. (2013). **A Multi-product and Multi-Period Model for a Procurement-production- distribution in Supply Chain with Fuzzy Parameters.** Journal of Industrial Engineering, vol. 46, no. 2, pp. 147-158.
- [19] Mohammed, Awsan M., and Salih O. Duffuaa., (February 2020). **A Tabu Search Based Algorithm for the Optimal Design of Multi-Objective Multi-product supply chain Networks.** Expert Systems with Applications, vol. 140, Article 112808.
- [20] Chen, S. P. and Chang, P. C. (2006). **A Mathematical programming approach to Supply Chain Models With fuzzy parameters.** Engineering Optimization, vol. 36, no. 6, pp. 647-669.
- [21] yousefi, O, et al, (Summer and Autumn 2018). **Integrated Production-Distribution Planning in a Reverse Supply Chain via Multi-Objective Mathematical Modeling; Case study in a High-Tech Industry.** Production and Operations Management, vol. 9, no. 2, pp. 57-76.
- [22] Torabi, S. A. and Hassini, E. (2008). **An Interactive Possibilistic Programming Approach for Multiple Objective Supply Chain Master Planning.** Fuzzy Sets and Systems, vol. 159, pp. 193 -214.
- [23] Amin-Tahmasbi, H., Badri, S. A., and Rezazadeh, B. (May 2019). **A Novel Mix Integer Linear Programming Model for design of multi-level Integrated supply chain.** Journal of Transportation Engineering, Accepted
- [24] Nagurney, A. (2010). **Optimal Supply Chain Network design and redesign at minimal total cost and with demand satisfaction.** int. J. Production Economics, vol. 128, no. 1, pp. 200-208.
- [25] Altiparmak, F. Gen, M. Lin, L. and Karaoglan, I. (2009). **A steady- state genetic algorithm for multi- product supply chain network design.** Computers & Industrial Engineering, vol. 56, no. 2, pp. 521-537
- [26] Bashiri, M. and Khorasani, H. J. (2015). **Multi-objective Supply chain network design with agility elements.** in Master's thesis, Tehran, Eyvanekey institute of higher education, pp. 1-133.
- [27] Haupt, Randy L., and Sue Ellen Haupt. (2004). **Practical genetic algorithms.**
- [28] Engelbrecht, Andries P. (2007). **Computational intelligence: an introduction.** John Wiley & Sons.
- [29] Eusuff, M., Lansey, K., & Pasha, F. (2006). **Shuffled frog-leaping algorithm: a memetic meta-heuristic for discrete optimization.** Engineering optimization. 38(2), 129-154

تأمین کنندگان و تولیدکنندگان فعال شبکه خود می‌توانند مدیریت هزینه را نیز داشته باشند.

#### منابع و مأخذ

- [1] Jabale, M., and Hassan-Pour, H. A. (2017). **Design A Multi-Objective, Multi-Level Supply Chain Network Based on Agility and Values of the Organizational and Solving it with an Efficient Method.** In Master's Thesis, Tehran, Imam Hossein University, 1-250.
- [2] Liu, S. C., and Lee, S. B. (2003). **A Two-phase Heuristic Method for the Multi-depot Location Routing Problem Taking Inventory Control Decisions into Consideration.** Int. J. Advanced Manufacturing Technology, vol. 22, no. 11, pp. 941-950.
- [3] Sajjadi, H., and Davoudpour, H. (2012). **Two-Echelon, Multi-commodity Supply Chain Network Design With Mode Selection, Lead-times and Inventory Costs.** Computers & Operations Research, vol. 39, no. 7, pp. 1345-1354.
- [4] Altiparmak, F. Gen, M. Lin, L. and Paksoy, T. (2006). **A Genetic Algorithm Approach for Multi-Objective Optimization of Supply Chain Networks.** Computers & Industrial Engineering, vol. 51, no. 1, pp. 196-215.
- [5] Sahraeian, R. Bashiri, M. and Ramezani, M., (2010). **A Stochastic Multi-Product, Multi-Stage Supply Chain Design Considering Products Waiting Time in the Queue.** In Proceedings of the 2010 International Conference on Industrial Engineering and Operations Management, 577-583.
- [6] Fakhrzad, M. B. Sadeghiye, A. and Boroujeni, P. M. (2014). **Modeling the Production and Distribution in Three-Level Supply Chain Based on Lean Thinking and Its Solution Using Lingo and GA.** International Journal of Industrial Engineering & Production Management, vol. 25, no. 3, pp. 365-375.
- [7] Kazemi, A., Sarrafha, K., and Alinezhad, A. R. (2014). **A Model to Integrated Production-Distribution Planning in a Supply Chain.** Journal of Development and evolution Management, vol. 6, no. 19, pp. 61-66
- [8] Yilmaz, P., and Çatay, B. (2006). **Strategic level three-stage production distribution planning with capacity expansion.** Computers & Industrial Engineering, vol. 51, no. 4, pp. 609-620.
- [9] Liu, S., and Papageorgiou, L. G. (2013). **Multi-Objective Optimisation of production, Distribution and Capacity Planning of Global Supply Chains in the Process Industry.** Omega, vol. 41, no. 2, 369-382
- [10] Amiri, M., Barzegar, M., and Niknam Far, A. H., (2016). **Integrated Production-Distribution Planning with a Robust Optimization Approach in the Three-level Supply Chain.** Journal of Industrial Management Perspective, no. 23, pp. 9-28
- [11] Soltani -Tehrani, M., Mosaddeghkhal, M., and Hassan-Pour, H. A. (2016). **Optimization of Closed-loop Supply Chain, Multi-level, Multi-product, Multi -Period to Reduce Costs in Supply Chain.** Iranian Journal of Supply Chain Management, vol. 18, no. 53, pp. 27-36
- [12] Sarrafha, K., Kazemi, A., and Alinezhad, A. R. (2015). **Integrated Production-Distribution Planning Problem in a Multi-Echelon Supply Chain Network Design and Optimization: A Multi-Objective Evolutionary Approach.** International Journal of Industrial Engineering & Production Management, vol. 26, no. 3, pp. 283-289.
- [13] Hassan-Pour, H. A., and Jabale, M. (, 2018). **Design a**