

## مدل برنامه‌ریزی بازیابی زنجیره تامین سه سطحی پس از وقوع اختلال تامین

فاطمه قاسم زاده گوری<sup>۱\*</sup>، نلیا الفت<sup>۲</sup>، مقصود امیری<sup>۳</sup>، ابراهیم تیموری<sup>۴</sup>

۱- استادیار، گروه مدیریت و حسابداری، دانشکده علوم انسانی، دانشگاه زنجان، زنجان، ایران

۲- استاد، گروه مدیریت صنعتی، دانشکده مدیریت و حسابداری، دانشگاه علامه طباطبائی، تهران، ایران

۳- استاد، گروه مدیریت صنعتی، دانشکده مدیریت و حسابداری، دانشگاه علامه طباطبائی، تهران، ایران

۴- استاد، گروه مهندسی صنایع، دانشکده مهندسی صنایع، دانشگاه علم و صنعت، تهران، ایران

رسید مقاله: ۱۲ آذر ۱۴۰۰

پذیرش مقاله: ۲ خرداد ۱۴۰۱

### چکیده

در مقاله حاضر، به ارائه مدل برنامه‌ریزی بازیابی پس از وقوع اختلال پرداخته شده است. مدل ارائه شده با هدف کمینه‌سازی هزینه بازیابی یک زنجیره تامین سه سطحی شامل چندین تامین کننده، یک تولید کننده و چندین خرده فروش می‌باشد که در هر یک از تامین کنندگان ممکن است اختلالی رخ دهد که منجر به عدم تحقق سفارشات تولید کننده گردد و نهایتاً تقاضای مشتریان تامین نشود. هدف اصلی این تحقیق کمک به تصمیم‌گیری در خصوص میزان تامین، تولید و ارسال بین حلقه‌های مختلف زنجیره تامین می‌باشد به گونه‌ای که پس از وقوع اختلال با کم‌ترین هزینه به شرایط قبل از اختلال باز گردد. برای این منظور از مدل‌سازی ریاضی استفاده شده و مدل طراحی شده که یک مدل برنامه‌ریزی غیرخطی و عدد صحیح مختلط می‌باشد با یک الگوریتم ابتکاری پیشنهادی حل شده است. همچنین جهت ارزیابی کارایی روش حل ارائه شده، مدل برای مسایل آزمایشی طراحی شده، با نرم افزار GAMS 24 نیز حل و پاسخ‌ها مقایسه گردید که اختلاف مقادیر به دست آمده در دو روش با معیار درصد انحراف ارزیابی شده و نشان می‌دهد پاسخ‌ها مناسب می‌باشند.

**کلمات کلیدی:** زنجیره تامین، برنامه‌ریزی بازیابی، اختلال تامین، مدیریت اختلال.

### ۱ مقدمه

جهانی‌سازی اقتصاد و رشد برون‌سپاری، زنجیره‌های تامین را پیچیده‌تر و وابسته‌تر کرده است و در بسیاری صنایع، زنجیره‌های تامین به علت کمبود ظرفیت‌های پشتیبانی، در معرض ریسک‌های بزرگی قرار گرفته‌اند که تاکنون بی سابقه بوده است [۱، ۲]. بررسی‌ها حاکی از آن است که شرکت‌ها در مورد اختلالات زنجیره تامین بسیار نگران هستند. مطالعات انجام شده بر روی ۱۵۱ مدیر اجرایی زنجیره تامین نشان می‌دهد که ۷۳٪ از مدیران اجرایی اشاره کرده‌اند که در طی پنج سال اخیر زنجیره تامین آن‌ها دچار اختلال شده است و ۴۸٪ آن‌ها انتظار داشتند که ریسک

\* عهده‌دار مکاتبات

آدرس الکترونیکی: Ghasemzadeh.fa@gmail.com

اختلال‌ها در طی سه سال آتی افزایش یابد [۳]. نمونه‌های متعددی از بی‌نظمی‌های زنجیره‌تأمین وجود دارد که برخی از آن‌ها عبارتند از: شرکت اریکسون به دلیل آسیب تسهیلات تولیدی تأمین‌کنندگان نیمه هادی در طی آتش سوزی سال ۲۰۰۰، حدود ۴۰۰ میلیون یورو زیان دید، کارخانه Land Rover به دلیل ورشکستگی تأمین‌کنندگان در سال ۲۰۰۱، حدود ۱۴۰۰ نفر از پرسنل خود را منتظر خدمت کرد، شرکت Dole با آسیبی که به مزارع موز در آفریقای جنوبی در سال ۱۹۹۸ وارد شد سود قابل ملاحظه‌ای را از دست داد و شرکت Ford به دلیل ترافیک هوایی پس از حادثه ۱۱ سپتامبر ۲۰۰۱، مجبور به تعطیلی ۵ کارخانه برای چندین روز شد و طی دو سال گذشته بسیاری از شرکت‌ها به علت همه‌گیری کرونا تعطیل یا نیمه تعطیل شدند. [۴-۶]

در مطالعات مدیریت ریسک اغلب با پیش‌بینی اختلالات احتمالی سعی بر انتخاب بهترین تصمیم در مورد نحوه عملکرد حلقه‌های زنجیره‌تأمین می‌باشد؛ اما واقعیت این است که نمی‌توان همه اختلالات را پیش‌بینی نمود و گاهی اوقات اتفاقاتی رخ می‌دهد که زنجیره‌تأمین را از اجرای فعالیت‌ها طبق برنامه‌ریزی قبلی منحرف می‌سازد، تحقیق حاضر در پی ارائه مدل ریاضی برنامه‌ریزی تأمین، انبارش و توزیع در زنجیره‌تأمین پس از وقوع اختلال می‌باشد، این نوع برنامه را برنامه بازیابی<sup>۲</sup> می‌نامند که در حوزه مطالعات مدیریت اختلال قرار می‌گیرد و در پی بازیابی سیستم مختل شده با هدف کمینه‌سازی کل هزینه‌های زنجیره‌تأمین و بازگشت زنجیره‌تأمین به حالت قبل از اختلال می‌باشد. به عبارت دیگر به دنبال پاسخ این سوال هستیم که در صورت بروز اختلال در تأمین‌کننده، مدل برنامه‌ریزی تولید-موجودی چه تغییری می‌کند؟

نوع تحقیق از منظر هدف، توسعه‌ای-کاربردی می‌باشد و از آنجا که به دنبال ارائه مدل برنامه‌ریزی ریاضی جهت مدیریت اختلالات تأمین در زنجیره‌تأمین سه سطحی می‌باشد توسعه‌ای است، بررسی‌های انجام‌شده در مقالات موجود در این حوزه حاکی از توجه بسیار اندک محققین به استفاده از مدل‌سازی ریاضی جهت بازیابی سیستم پس از اختلال می‌باشد به طوری که تنها در چند مقاله در سال‌های اخیر این موضوع یافت گردید که در بخش مرور ادبیات مورد بررسی قرار می‌گیرد.

این مقاله شامل پنج بخش اصلی می‌باشد، در بخش دوم به مرور ادبیات موضوع پرداخته‌شده، در بخش سوم مدل ریاضی طراحی شده تشریح گردیده و در بخش چهارم مثال عددی مطرح و نهایتاً در بخش پنجم نتیجه‌گیری و ارائه پیشنهادات برای تحقیقات آتی ارائه شده است.

## ۲ مرور ادبیات

یکی از خطرات اصلی عدم اطمینان، بروز اختلال می‌باشد که در مسیر برنامه‌ریزی‌شده زنجیره‌تأمین تأثیرگذار است. حوادثی که فعالیت‌های زنجیره‌تأمین را مختل می‌کند، در یک تقسیم‌بندی کلی شامل حوادث درونی و بیرونی می‌باشد. حوادث درونی زنجیره‌تأمین دارای اثر مخرب‌تری در مقایسه با حوادث بیرونی می‌باشد. حوادث بیرونی زنجیره‌تأمین، اصطلاحاً "حوادث محیطی" (شامل تغییرات تکنولوژی یا اقتصادی، اقدامات رقبا و ...) نامیده می‌شوند. حوادث درونی ممکن است در سمت بالا دستی زنجیره‌تأمین (شامل: تحویل‌ها یا دریافت‌های

<sup>2</sup> Recovery Plan

کند، کمبود مواد یا خدمت در دسترس و ...)، قسمت میانی یا مرکزی زنجیره (کمبود ظرفیت کافی و مناسب، عملکرد یا خروجی نامرغوب فرایند و ...) و سمت پایین دستی (شامل: تغییرات در ترکیب تقاضا، تغییر در زمانبندی یا حجم تقاضای درخواستی) اتفاق بیافتد [۱، ۷-۱۰]. صلاحی [۱۱] در پژوهشی به ارزیابی و رتبه‌بندی اختلالات زنجیره‌تأمین پرداخته و نشان داد که بحرانی‌ترین اختلال‌ها، اختلال مربوط به بلایای طبیعی است. همچنان که وابستگی و ارتباطات متقابل اعضاء زنجیره برای رفع نیازمندی‌ها افزایش می‌یابد، این امر تعداد و تنوع حوادث بالقوه برای شرکت‌ها را بیشتر می‌کند [۱۲، ۱۳]. همزمان با تغییرات یادشده، زنجیره‌های تأمین تکنیک‌های جدیدی نظیر سیستم‌های ناب<sup>۳</sup> و Jit را تجربه می‌کنند که این شیوه‌ها مبتنی بر روابط تنگاتنگ تولیدکننده و تأمین‌کننده و سیاست‌های موجودی سخت که به حذف ذخیره احتیاطی و موجودی در بین فرایندها تاکید دارد، می‌باشد. روندهای فوق باعث افزایش شکنندگی و آسیب‌پذیری زنجیره‌های تأمین شده است [۱۴، ۱۵]. تلاش‌های صورت گرفته برای ایجاد زنجیره‌های تأمین با کارایی بالاتر و هزینه‌های پایین‌تر ممکن است به نتایج پیش‌بینی‌نشده‌ای منجر شود که ریسک وقوع بی‌نظمی و ایجاد وقفه در زنجیره‌تأمین را بالا برده و یا باعث گسترش شدت اثر حوادث می‌شود [۱].

اگرچه اختلال‌ها می‌توانند در چندین شرکت بروز نمایند، اما وابستگی‌های متقابل میان شرکت‌ها سبب گسترش و تسری اختلال به سایر اعضا می‌شود. بنابراین هنگامی که حادثه‌ای در سایر بخش‌های زنجیره‌تأمین اتفاق بیفتد، چه بسا سایر اعضا برای اختلال در جریان کالاها و خدمات خود مستعد می‌شوند. بنابراین شرکت‌ها باید زنجیره‌تأمینی ایجاد نمایند که اولاً ایمن باشد (کاهش احتمال یا کاهش تاثیر حوادث) و ثانیاً قابل ارتجاع باشد (توانایی انطباق، پاسخگویی و بهبود هنگام وقوع حادثه) تا اثر کل حوادثی که به اختلال می‌انجامد، در زنجیره‌تأمین به حداقل برسد [۱۶، ۱]. اما مطالعات اخیر نشان می‌دهد که تنها ۲۵٪ - ۵٪ شرکت‌هایی که جزء ۵۰۰ Fortune می‌باشند به طور رسمی خود را برای بحران‌ها و اختلال‌های جدی آماده می‌کنند [۱۷] و کمتر از ۲۰٪ شرکت‌ها شبکه تأمین خود را به طور سالانه مورد بازبینی قرار می‌دهند [۱۸]. این ضعف در برنامه‌ریزی در حالی است که آمارهای صنعتی نشان‌دهنده افزایش اختلال‌ها به دلایل مختلف طبیعی و انسانی می‌باشد [۱۹].

تاکنون روش‌های متعددی برای مواجهه با تغییرات و عدم اطمینان در زنجیره‌تأمین مورد توجه قرار گرفته‌اند. برای اداره‌ی اثر متقابل ریسک‌های عرضه و تقاضا، روش‌هایی مانند Jit، مدیریت موجودی توسط فروشنده (VMI) و بازپرسازی مستمر<sup>۴</sup> (که سریعاً جواب می‌دادند) گسترش یافتند [۲۰-۲۲]. مطالعات [۱۹، ۲۳] در همین رابطه نشان می‌دهد که مدیریت ضعیف اختلال می‌تواند اثر نامطلوبی بر اعتبار شرکت داشته باشد، ذهنیت بازار نسبت به علامت تجاری شرکت تغییر کند و به روابط با مشتری آسیب بزند. در عوض اداره مناسب چنین حوادثی، سرانجام به فرصت‌ها و موقعیت‌های خوبی برای شرکت‌ها می‌انجامد. خلاصه‌ای از تحقیقات انجام‌شده در سال‌های گذشته در حوزه‌های مرتبط با اختلال در جدول ۱ آمده است.

<sup>3</sup> -Lean production

<sup>4</sup> -Continuous replenishment

جدول ۱. خلاصه‌ای از تحقیقات انجام شده در زمینه مدیریت اختلال در زنجیره‌های تامین

| منبع | نوع اختلال |       |       | سطوح زنجیره تامین |             |           | روش حل     |
|------|------------|-------|-------|-------------------|-------------|-----------|------------|
|      | تامین      | تولید | تقاضا | تامین کننده       | تولید کننده | خرده فروش |            |
| [۲۰] | *          |       |       |                   | *           |           | قطعی       |
| [۲۱] |            | *     |       |                   | *           | *         | شبیه‌سازی  |
| [۲۲] | *          |       |       | *                 | *           |           | فراابتکاری |
| [۲۴] | *          |       |       | *                 | *           | *         | شبیه‌سازی  |
| [۲۵] |            | *     |       |                   | *           |           | شبیه‌سازی  |
| [۲۶] |            | *     |       |                   | *           |           | ابتکاری    |
| [۲۷] |            | *     |       |                   | *           |           | ابتکاری    |
| [۲۸] | *          |       |       | *                 | *           |           | ابتکاری    |
| [۲۹] |            |       | *     | *                 |             | *         | فراابتکاری |
| [۳۰] |            | *     |       | *                 |             |           | فراابتکاری |
| [۳۱] |            | *     |       |                   | *           |           | فراابتکاری |
| [۳۲] |            | *     |       |                   | *           |           | فراابتکاری |
| [۳۳] |            | *     |       |                   | *           |           | ابتکاری    |
| [۳۴] |            |       | *     | *                 | *           | *         | ابتکاری    |
| [۳۵] | *          |       |       | *                 | *           |           | شبیه‌سازی  |
| [۳۶] |            | *     |       |                   | *           |           | شبیه‌سازی  |
| [۳۷] |            | *     |       | *                 | *           | *         | ابتکاری    |
| [۳۷] |            | *     | *     | *                 | *           | *         | ابتکاری    |
|      | *          |       |       | *                 | *           | *         | تحقیق حاضر |

در تحقیق حاضر به ارایه مدل یکپارچه در زنجیره‌تامین سه سطحی شامل تامین کننده، تولید کننده و خرده‌فروشان با در نظر گرفتن شرایط اختلال در تامین کننده می‌پردازد و حل مدل ارایه شده توسط الگوریتم ابتکاری پیشنهادی صورت می‌گیرد. با توجه به بررسی‌هایی که بر روی مطالعات و تحقیقات قبلی صورت گرفته است، می‌توان به نوآوری‌های زیر در این تحقیق اشاره نمود:

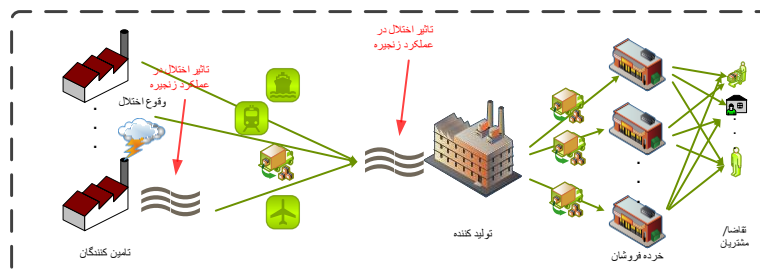
۱- در این تحقیق مدل بازیابی زنجیره‌تامین سه سطحی طراحی شده و الگوریتمی برای حل مدل نیز ارایه می‌گردد، رویکرد مدل‌سازی با استفاده از سیستم‌های تولید-موجودی و در نظر گرفتن سیستم سفارش‌دهی هر یک از اجزا زنجیره‌تامین پس از وقوع اختلال، در ادبیات موضوع دارای نوآوری می‌باشد.

۲- در مدل طراحی شده، وضعیت همه اجزای زنجیره‌تامین در صورت وقوع اختلال در یک جز، مورد بررسی و مدل‌سازی قرار می‌گیرد که در نوع خود منحصر به فرد می‌باشد. به عبارت دیگر تسری اختلال

یک حلقه از زنجیره به دیگر اجزا، در این تحقیق مورد مطالعه قرار می‌گیرد که می‌تواند از نظر کاربردی در سازمان‌ها در شرایط واقعی بسیار کارآمد و مفید واقع گردد.

### ۳ مدل سازی مساله

زنجیره تامین مورد بررسی شامل چند تامین کننده مواد اولیه، یک تولیدکننده و چند خرده فروش می‌باشد که کالای تولید شده را به مشتریان می‌رسانند تا تقاضای بازار تامین گردد. فرض اولیه در سیستم حاضر آن است که این زنجیره تامین در حال فعالیت بر اساس یک برنامه جامع بهینه بوده است که در اثر بروز یک اختلال که می‌تواند هر نوع حادثه‌ای اعم از بلایای طبیعی یا سهل انگاری انسانی باشد، دچار انحراف از برنامه در کل یا بخشی از زنجیره شده است و در برنامه بازیابی سعی بر آن است که با برنامه ریزی مجدد با کمترین هزینه زنجیره تامین را به شرایطی برگردانیم که امکان اجرای برنامه جامع اولیه مجدداً به وجود آید یا به عبارت دیگر زنجیره تامین را با کمترین هزینه به حالت اولیه بازگردانیم.



شکل ۱. نمایی از وقوع اختلال در زنجیره تامین مورد مطالعه

اختلال در یکی از تامین کنندگان، توقف تولید در تولیدکننده را موجب می‌شود در حالی که بقیه تامین کنندگان طبق برنامه قبلی به ارسال مواد اولیه به تولیدکننده ادامه می‌دهند؛ لذا موجودی بقیه مواد در انبار تولیدکننده افزایش می‌یابد که می‌بایست سفارشات بعدی به گونه‌ای به تعویق افتد که موجودی انباشته شده مصرف گردد. با به کارگیری سیاست کنترل موجودی سفارش پس از اتمام موجودی، سعی می‌شود این موضوع تحت کنترل قرار گیرد.

در تحقیق حاضر سعی بر آن است که پس از وقوع اختلال در یک تامین کننده، میزان سفارشات، تولید و انتقال کالا بین حلقه‌های مختلف زنجیره تامین را به گونه‌ای تعیین نماییم که هزینه‌های دوره بازیابی کمینه گردد. طول دوره بازیابی محدود و هزینه‌های بازیابی شامل هزینه‌های انبارداری، تولید، سفارش گذاری، حمل و نقل بین حلقه‌های مختلف زنجیره، هزینه‌های فروش از دست رفته و پس افت تقاضا می‌باشند. مفروضات زیر در مدل سازی مدنظر می‌باشند:

- زنجیره تامین سه سطحی و شامل تامین کنندگان، تولیدکننده و خرده فروشان می‌باشد.
- زنجیره تامین تک محصولی است.

- اختلال ممکن است درون هر یک از تامین کنندگان رخ دهد که عملکرد آن حلقه را برای مدتی متوقف می‌سازد.
- دوره زمانی برنامه‌ریزی بازیابی از شروع دوره وقوع اختلال آغاز می‌گردد.
- زنجیره تامین نسبت به وقوع اختلال آگاه می‌باشد. یعنی فاصله زمانی بین وقوع اختلال و شناسایی آن صفر در نظر گرفته می‌شود.
- سود از دست رفته در صورت عدم تامین تقاضای مشتری، به عنوان هزینه کمبود محصول در محاسبات منظور می‌گردد و در صورتی که سفارشات با تاخیر زمانی تامین گردد هزینه پس افت تقاضا شامل آن می‌شود.
- هزینه‌های ثابت تولید، سفارش دهی، انبارداری، فروش از دست رفته و پس افت تقاضا، معین و شناخته شده هستند.
- انتقال کالا بین حلقه‌های سطوح مختلف زنجیره تامین مجاز و بین حلقه‌های هر سطح غیرمجاز می‌باشد. به عنوان مثال تامین کنندگان نمی‌توانند به یکدیگر کالا ارسال نمایند اما هر تامین کننده می‌تواند به تولید کننده کالا ارسال نماید.
- نرخ تولید و نرخ تقاضای هر یک از خرده فروشان ثابت و معین می‌باشد.
- نرخ تولید بیش از نرخ تقاضا می‌باشد.
- نرخ تامین مواد اولیه بیش از نرخ تقاضاست.
- در دوره‌های بعد از اختلال هیچ کمبودی مجاز نیست. (فقط در دوره‌ای که اختلال رخ داده کمبود به وجود می‌آید).
- سیاست سفارش دهی تولیدکننده، سفارش پس از اتمام موجودی می‌باشد.
- تامین کننده دچار اختلال شده و تولیدکننده مجاز هستند در پایان هر دوره، موجودی نزد خود داشته باشند.
- دوره‌های زمانی گسسته و افق زمانی بازیابی محدود می‌باشد.
- فقط هزینه‌های دوره بازیابی در محاسبات منظور می‌گردد.
- طول دوره اختلال کمتر از یک دوره برنامه‌ریزی در شرایط عادی زنجیره می‌باشد.
- فقط در یکی از تامین کنندگان اختلال رخ می‌دهد.

### ۳-۱ نشانه‌ها

|                      |   |                      |  |
|----------------------|---|----------------------|--|
| $r : 1, 2, \dots, R$ | اندیس مربوط به خرده فروشان                              | $s : 1, 2, \dots, S$ | اندیس مربوط به تامین کنندگان                       |
| $AS$                 | هزینه راه اندازی تولیدکننده                             | $A_s$                | هزینه راه اندازی تامین کننده $s$                   |
| $H_s$                | هزینه نگهداشت یک واحد ماده اولیه $s$ در تامین کننده $s$ | $AO_s$               | هزینه ثابت سفارش دهی تولیدکننده از تامین کننده $s$ |

|        |  |           |  |
|--------|--|-----------|--|
| $H_r$  | هزینه نگهداشت یک واحد محصول در خرده فروش $r$                             | $A_r$     | هزینه ثابت سفارش دهی خرده فروش $r$                                   |
| $H$    | هزینه نگهداشت یک واحد محصول در تولید کننده                               | $HM_s$    | هزینه نگهداشت یک واحد ماده اولیه $s$ در تولید کننده                  |
| $P$    | نرخ تولید تولید کننده  | $P_s$     | نرخ تولید تامین کننده $s$  |
| $DM_s$ | نرخ تقاضای تولید کننده برای ماده اولیه $s$                               | $D_r$     | نرخ تقاضای محصول در خرده فروش $r$                                    |
| $Q$    | اندازه تولید در تولید کننده در شرایط عادی                                | $Q_s$     | اندازه تولید در تامین کننده $s$ در شرایط عادی                        |
| $V_r$  | اندازه سفارش خرده فروش $r$ در شرایط عادی                                 | $V$       | اندازه سفارش تولید کننده در شرایط عادی                               |
| $BL_r$ | مقدار پس افت تقاضا در خرده فروش $r$                                      | $BL$      | مقدار پس افت تقاضا در تولید کننده                                    |
| $LS_r$ | مقدار فروش از دست رفته در خرده فروش $r$                                  | $LS$      | مقدار فروش از دست رفته در تولید کننده                                |
| $T_d$  | دوره اختلال در تولید کننده   | $TS_d$    | دوره اختلال در تامین کننده   |
| $q$    | مقدار تولید شده در تولید کننده قبل از وقوع اختلال                        | $q_s$     | مقدار تولید شده در تامین کننده $s$ قبل از وقوع اختلال                |
| $\xi$  | زمان بیکاری تولید در تامین کننده در شرایط عادی                           | $\rho$    | زمان فعالیت تولید در تامین کننده در شرایط عادی                       |
| $T_s$  | طول یک دوره تولید در تامین کننده $s$ در شرایط عادی                       | $\varphi$ | زمان بیکاری تولید در تولید کننده در شرایط عادی                       |
| $t_f$  | لحظه پایان دوره بازیابی  | $t_o$     | لحظه شروع دوره بازیابی   |
| $T_r$  | طول یک دوره سفارش دهی در خرده فروش $r$ در شرایط عادی                     | $T$       | طول یک دوره تولید در تولید کننده در شرایط عادی                       |
| $BM_s$ | هزینه یک واحد پس افت تقاضا برای ماده اولیه $s$ در تولید کننده            | $B_s$     | هزینه یک واحد پس افت تقاضا در تامین کننده دچار اختلال شده            |
| $BM$   | هزینه یک واحد پس افت تقاضا برای محصول در تولید کننده                     | $B_r$     | هزینه یک واحد پس افت تقاضای محصول در خرده فروش $r$                   |
| $LM_s$ | هزینه یک واحد فروش از دست رفته برای ماده اولیه $s$ در تولید کننده        | $L_s$     | هزینه یک واحد فروش از دست رفته در تامین کننده دچار اختلال شده        |
| $L_r$  | هزینه یک واحد فروش از دست رفته محصول در خرده فروش $r$                    | $LM$      | هزینه یک واحد فروش از دست رفته برای محصول در تولید کننده             |
| $T_i$  | طول دوره تولید $i$ ام در تولید کننده در دوره بازیابی                     | $TS_i$    | طول دوره تولید $i$ ام در تامین کننده دچار اختلال شده در دوره بازیابی |
| $I_i$  | سطح موجودی پایان دوره $i$ ام تامین کننده دچار اختلال شده در دوره بازیابی | $T_{ri}$  | طول دوره سفارش دهی $i$ ام در خرده فروش $r$ در دوره بازیابی           |
| $MS_i$ | اندازه تولید تامین کننده دچار اختلال شده در دوره $i$ ام دوره بازیابی     | $IM_i$    | سطح موجودی پایان دوره $i$ ام تولید کننده در دوره بازیابی             |
| $O_i$  | اندازه سفارش تولید کننده به تامین کننده دچار                             | $M_i$     | اندازه تولید تولید کننده در دوره $i$ ام                              |

|       |   |  |
|-------|---|--|
|       | دوره بازیابی                            | دوره بازیابی شده در دوره $i$ ام دوره بازیابی |
|       | تعداد دوره‌ها در افق بازیابی برای       | اندازه سفارش خرده فروش $r$ در دوره $i$ ام    |
| $n_1$ | تامین کننده دچار اختلال شده             | دوره بازیابی                                 |
|       | تعداد دوره‌ها در افق بازیابی برای تولید | تعداد دفعات تولید در افق بازیابی برای        |
| $n_2$ | کننده و خرده فروش                       | تامین کننده دچار اختلال شده                  |
|       | تعداد دفعات تولید در افق بازیابی برای   |  |
| $z_2$ | تولید کننده                             |  |
|       |   | $O_{ri}$                                     |
|       |   | $z_1$  |

### ۲-۳ توابع هزینه مدل

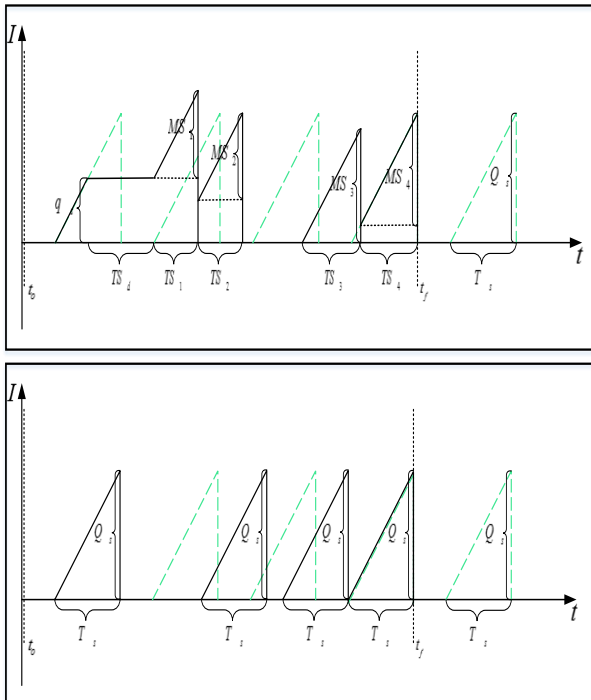
هزینه‌های مرتبط با تامین کننده‌ای که دچار اختلال شده است در دوره بازیابی عبارتند از: هزینه راه اندازی، نگهداشت موجودی، پس افت تقاضا و فروش از دست رفته.

هزینه راه اندازی از فرمول زیر محاسبه می‌شود:

$$FCS_s = A_s \cdot z_1 \quad (1)$$

$I_i$  را به عنوان سطح موجودی در پایان دوره  $i$ ام تعریف می‌کنیم که:

$$I_i = I_{i-1} + MS_i - O_i \quad \forall i = 1, \dots, z_1 \quad (2)$$



شکل ۲. نمودار سمت چپ وضعیت گردش موجودی تامین کننده دچار اختلال شده و نمودار سمت راست وضعیت گردش موجودی دیگر تامین کنندگان

خطوط نقطه چین در شکل ۲، برنامه حالت عادی سیستم را نشان می‌دهد و خطوط پر، برنامه بازیابی پس از وقوع اختلال را نشان می‌دهند. سطح زیر نمودار در طول دوره بازیابی، میزان موجودی را نشان می‌دهد پس داریم [۲۸]:

$$\begin{aligned}
 HC_s &= H_s \left( \frac{1}{\gamma} q_s \cdot \frac{q_s}{P_s} + q_s \cdot TS_d + I_s \cdot TS_1 + \frac{1}{\gamma} MS_1 \cdot TS_1 + I_1 \cdot TS_\gamma + \frac{1}{\gamma} MS_\gamma \cdot TS_\gamma + I_\gamma \cdot TS_\gamma + \frac{1}{\gamma} MS_\gamma \cdot TS_\gamma + \dots \right) \\
 &= H_s \left( \frac{1}{\gamma P_s} q_s^2 + q_s \cdot TS_d + (I_s + \frac{1}{\gamma} MS_1) TS_1 + (I_1 + \frac{1}{\gamma} MS_\gamma) TS_\gamma + (I_\gamma + \frac{1}{\gamma} MS_\gamma) TS_\gamma + \dots \right) \\
 &= H_s \left( \frac{1}{\gamma P_s} q_s^2 + q_s \cdot TS_d + (I_s + \frac{1}{\gamma} MS_1) \frac{MS_1}{P_s} + (I_1 + \frac{1}{\gamma} MS_\gamma) \frac{MS_\gamma}{P_s} + (I_\gamma + \frac{1}{\gamma} MS_\gamma) \frac{MS_\gamma}{P_s} + \dots \right) \\
 &= H_s \left( \frac{1}{\gamma P_s} q_s^2 + q_s \cdot TS_d + \sum_{i=1}^{z_1} (I_{i-1} + \frac{1}{\gamma} MS_i) \frac{MS_i}{P_s} \right) \quad (3)
 \end{aligned}$$

برای میزان کمبود موجودی که بر اثر این اختلال تامین، در تولیدکننده رخ خواهد داد، تولیدکننده متحمل هزینه‌ای خواهد شد که در توابع هزینه آن منظور می‌گردد، در اینجا برای اطمینان از این که تامین کننده نیز به عنوان عامل ایجاد کمبود، همان میزان حساسیت و توجه برای جبران را دارد، هزینه‌های کمبود (شامل فروش از دست رفته و پس‌افت تقاضا) از نمودار وضعیت موجودی تولیدکننده، در هزینه‌های تامین کننده نیز منظور می‌گردد.

در اثر بروز اختلال در تامین کننده، سفارشات تولیدکننده طبق برنامه ارسال نمی‌گردد؛ لذا تولیدکننده با کمبود موجودی مواجه می‌گردد که بخشی از این کمبود طی دوره های بازیابی تامین می‌گردد و بخشی از آن نیز تامین نخواهد شد، مقدار تامین شده با تاخیر را پس‌افت در نظر می‌گیریم و مابقی را به عنوان فروش از دست رفته در محاسبات منظور می‌کنیم که هر یک هزینه مربوط به خود را خواهد داشت. میزان فروش از دست رفته از فرمول زیر محاسبه می‌شود:

$$LS = n_1 V - q_s - \sum_{i=1}^{z_1-1} O_i \quad (4)$$

و مقدار پس‌افت تقاضا یا فروش معوقه به شرح زیر می‌باشد:

$$BL = \left( \xi + \frac{q_s}{P_s} + TS_d + \frac{MS_1}{P_s} - \frac{V}{P} \right) \cdot P - LS \quad (5)$$

بنابراین با توجه به نمودار گردش موجودی برای تابع هزینه پس‌افت تقاضا و فروش از دست رفته داریم:

$$BLC_s = B_s \cdot \left( \xi + \frac{q_s}{P_s} + TS_d + \frac{MS_1}{P_s} - \frac{V}{P} \right) \cdot \frac{BL}{\gamma} \quad (6)$$

$$LSC_s = L_s \cdot LS \quad (7)$$

با استفاده از روابط ۷-۱، تابع هزینه تامین کننده دچار اختلال شده، در دوره بازیابی به شرح زیر می‌باشد:

$$TC_s = FCS_s + HC_s + BLC_s + LSC_s \quad (8)$$

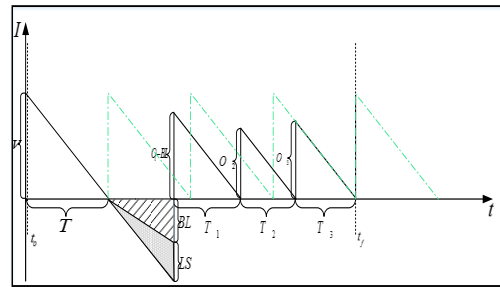
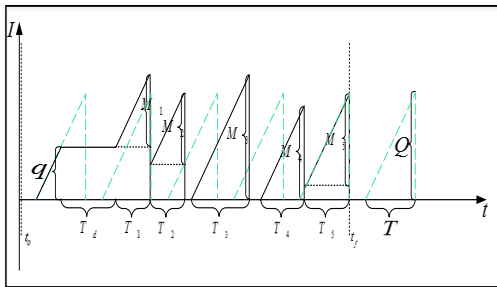
هزینه‌های مربوط به دیگر تامین کنندگان که در شرایط عادی به کار خود ادامه می‌دهند عبارت است از:

$$TC'_s = \sum_{s=1}^S (A_s \cdot z_1 + \frac{H_s}{\gamma} T_s Q_s z_1) \quad (9)$$

هزینه‌های مرتبط با تامین مواد اولیه توليدکننده در دوره بازیابی این اختلال عبارتند از: هزینه سفارش‌دهی، نگهداشت موجودی، پس‌افت تقاضا و فروش از دست رفته.

هزینه سفارش‌دهی از فرمول زیر محاسبه می‌گردد:

$$OCM = AO \cdot (z_1 - 1) \quad (10)$$



شکل ۳. نمودار وضعیت گردش موجودی در توليدکننده (سمت چپ محصول و سمت راست مواد اولیه)

سطح زیر نمودار در طول دوره بازیابی، میزان موجودی را نشان می‌دهد پس داریم:

$$\begin{aligned} HCM_1 &= \frac{1}{\gamma} HM_s \left( V \frac{V}{P} + (O_1 - BL)T_1 + O_1 T_1 + O_1 T_1 + \dots \right) \\ &= \frac{1}{\gamma} HM_s \left( \frac{V^2}{P} + (O_1 - BL) \frac{(O_1 - BL)}{P} + O_1 \frac{O_1}{P} + O_1 \frac{O_1}{P} + \dots \right) \\ &= \frac{HM_s}{\gamma P} (V^2 + (O_1 - BL)^2 + O_1^2 + O_1^2 + \dots) \\ &= \frac{HM_s}{\gamma P} (V^2 + (O_1 - BL)^2 + \sum_{i=2}^{z_1-1} O_i^2) \end{aligned} \quad (11)$$

هزینه‌های کمبود شامل فروش از دست رفته و پس‌افت تقاضا نیز همچون مواردی که در قسمت هزینه‌های تامین‌کننده درج گردید، محاسبه می‌شود:

$$BLC_{M_1} = BM_s \cdot \left( \xi + \frac{q_s}{P_s} + TS_d + \frac{MS_1}{P_s} - \frac{V}{P} \right) \cdot \frac{BL}{\gamma} \quad (12)$$

$$LSC_{M_1} = LM_s \cdot LS \quad (13)$$

با استفاده از روابط ۱۰-۱۳، تابع هزینه توليدکننده در ارتباط با تامین‌کننده دچار اختلال شده، در دوره بازیابی اختلال تامین‌کننده به شرح زیر می‌باشد:

$$TCM_d = OCM + HCM_1 + BLC_{M_1} + LSC_{M_1} \quad (14)$$

در این شرایط به علت عدم مصرف مابقی مواد اولیه که توسط دیگر تامین کنندگان، تامین می شود زمان ارسال محموله های بعدی این تامین کنندگان نیز بازنگاری می گردد و تابع هزینه سفارش دهی تولید کننده به تامین کنندگان دیگر که دچار اختلال نشده اند به شرح زیر تغییر می یابد:

$$TCM'_d = \sum_{s=1}^S (AO_s \cdot z_1 + \frac{HM_s}{\gamma} T_s Q_s z_1 + HM_s \cdot Q_s \cdot TS_d) \quad (15)$$

همان طور که پیشتر نیز اشاره گردید در صورت بروز اختلال در تامین کننده، آثار آن در تولید محصول توسط تولید کننده و همچنین در خرده فروشان نیز بروز می کند. هزینه های مرتبط با تولید کننده در دوره بازبایی عبارتند از: هزینه راه اندازی، نگهداشت موجودی، پس افت تقاضا و فروش از دست رفته. هزینه راه اندازی از فرمول زیر محاسبه می شود:

$$FCM = AS \cdot z_r \quad (16)$$

$IM_i$  را به عنوان سطح موجودی در پایان دوره  $i$ ام تعریف می کنیم که:

$$IM_i = IM_{i-1} + M_i - \sum_{r=1}^R O_{ri} \quad \forall i = 1, \dots, z_r \quad (17)$$

سطح زیر نمودار در طول دوره بازبایی، میزان موجودی را نشان می دهد پس داریم:

$$\begin{aligned} HCM_r &= H \left( \frac{1}{\gamma} q \cdot \frac{q}{P} + q \cdot T_d + IM \cdot T_1 + \frac{1}{\gamma} M_1 \cdot T_1 + IM_1 \cdot T_r + \frac{1}{\gamma} M_r \cdot T_r + IM_r \cdot T_r + \frac{1}{\gamma} M_r \cdot T_r + \dots \right) \\ &= H \left( \frac{1}{\gamma P} q^2 + q \cdot T_d + (IM + \frac{1}{\gamma} M_1) T_1 + (IM_1 + \frac{1}{\gamma} M_r) T_r + (IM_r + \frac{1}{\gamma} M_r) T_r + \dots \right) \\ &= H \left( \frac{1}{\gamma P} q^2 + q \cdot T_d + (IM + \frac{1}{\gamma} M_1) \frac{M_1}{P} + (IM_1 + \frac{1}{\gamma} M_r) \frac{M_r}{P} + (IM_r + \frac{1}{\gamma} M_r) \frac{M_r}{P} + \dots \right) \\ &= H \left( \frac{1}{\gamma P} q^2 + q \cdot T_d + \sum_{i=1}^{z_r} (IM_{i-1} + \frac{1}{\gamma} M_i) \frac{M_i}{P} \right) \end{aligned} \quad (18)$$

برای محاسبه میزان فروش از دست رفته هر یک از خرده فروشان رعایت اصل تسهیم به نسبت در توزیع میزان کالای تولید شده به نسبت میزان سفارشات هر یک از خرده فروشان در نظر گرفته می شود که از فرمول زیر محاسبه می گردد:

$$LS_r = n_r V_r - \frac{q}{\sum_{r=1}^R V_r} - \sum_{i=1}^{z_r-1} O_{ri} \quad (19)$$

و مقدار پس افت تقاضا یا فروش معوقه به شرح زیر می باشد:

$$BL_r = \left( \varphi + \frac{q}{P} + T_d + \frac{M_1}{P} - \frac{V_r}{D_r} \right) \cdot D_r - LS_r \quad (20)$$

بنابراین با توجه به نمودار گردش موجودی برای تابع هزینه پس افت تقاضا و فروش از دست رفته داریم:

$$BLC_R = BM \sum_{r=1}^R \left( \varphi + \frac{q}{P} + T_d + \frac{M_1}{P} - \frac{V_r}{D_r} \right) \cdot \frac{BL_r}{\gamma} \quad (21)$$

$$LSC_R = LM \sum_{r=1}^R LS_r \quad (22)$$

هزینه‌های مربوط به دوره بازیابی برنامه تولید با استفاده از روابط (۲۲)–(۱۶)، به شرح زیر می‌باشد:

$$TCM_d'' = AS \cdot z_r + H \left( \frac{1}{\sqrt{P}} q^r + q T_d + \sum_{i=1}^{z_r} (IM_{i-1} + \frac{1}{\sqrt{P}} M_i) \frac{M_i}{P} \right) + BM.$$

$$\sum_{r=1}^R \left( \varphi + \frac{q}{P} + T_d + \frac{M_1}{P} - \frac{V_r}{D_r} \right) \cdot \frac{\left( \varphi + \frac{q}{P} + T_d + \frac{M_1}{P} - \frac{V_r}{D_r} \right) \cdot D_r - \left( n_r V_r - \frac{q}{\sqrt{P}} - \sum_{i=1}^{z_r-1} O_{ri} \right)}{2} \quad (23)$$

$$+ LM \sum_{r=1}^R \left( n_r V_r - \frac{q}{\sqrt{P}} - \sum_{i=1}^{z_r-1} O_{ri} \right)$$

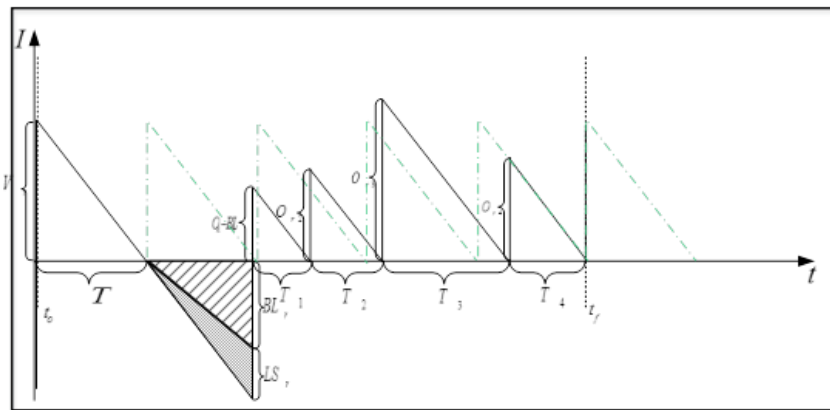
که در آن

$$T_d = \xi + \frac{q_s}{P_s} + TS_d + \frac{MS_1}{P_s} - \frac{V}{P} \quad (23)$$

همانند سطوح دیگر زنجیره‌تامین در این قسمت هزینه‌های مربوط به هر یک از خرده فروشان در دوره بازیابی اختلال که شامل هزینه سفارش‌دهی، نگهداشت موجودی، پس‌افت تقاضا و فروش از دست رفته می‌باشد محاسبه می‌گردد.

هزینه سفارش‌دهی از فرمول زیر محاسبه می‌گردد:

$$OC_r = A_r \cdot (z_r - 1) \quad (24)$$



شکل ۴. نمودار وضعیت گردش موجودی خرده‌فروشان

سطح زیر نمودار در طول دوره بازیابی، میزان موجودی را نشان می‌دهد پس داریم:

$$HC_r = \frac{1}{\sqrt{P}} H_r \left( V_r \frac{V_r}{D_r} + (O_{r1} - BL_r) T_{r1} + O_{r2} T_{r2} + O_{r3} T_{r3} + \dots \right)$$

$$= \frac{1}{\sqrt{P}} H_r \left( \frac{V_r^2}{D_r} + (O_{r1} - BL_r) \frac{(O_{r1} - BL_r)}{D_r} + O_{r2} \frac{O_{r2}}{D_r} + O_{r3} \frac{O_{r3}}{D_r} + \dots \right)$$

$$= \frac{H_r}{\sqrt{P} D_r} \left( V_r^2 + (O_{r1} - BL_r)^2 + O_{r2}^2 + O_{r3}^2 + \dots \right)$$

$$= \frac{H_r}{\gamma D_r} (V_r^\gamma + (O_{r1} - BL_r)^\gamma + \sum_{i=2}^{z_r-1} O_{ri}^\gamma) \quad (25)$$

هزینه‌های کمبود شامل فروش از دست رفته و پس‌افت تقاضا نیز همچون مواردی که در قسمت هزینه‌های تولیدکننده درج گردید، محاسبه می‌شود:

$$BLC_r = B_r \cdot (\varphi + \frac{q}{P} + T_d + \frac{M_1}{P} - \frac{V_r}{D_r}) \cdot \frac{BL_r}{\gamma} \quad (26)$$

$$LSC_r = LM \cdot LS_r \quad (27)$$

با استفاده از روابط (۲۸)–(۲۵)، تابع هزینه هر خرده‌فروش در دوره بازبایی اختلال تامین‌کننده به شرح زیر می‌باشد:

$$TC_r = OC_r + HC_r + BLC_r + LSC_r \quad (28)$$

و هزینه کل خرده‌فروشان عبارتند از:

$$TCR = \sum_{r=1}^R TC_r \quad (29)$$

با توجه به توضیحات داده شده مدل کلی مساله به صورت زیر نوشته می‌شود:

$$\text{Min } TC = TC_s + TC'_s + TCM_d + TCM'_d + TCM''_d + TCR \quad (30)$$

s.t.

$$MS_1 \leq Q_s - q_s \quad \text{شده دچار اختلال} \quad (31)$$

$$MS_i \leq Q_s \quad i = 1, 2, \dots, z_1 \quad (32)$$

$$\sum_{i=1}^{z_1} MS_i \leq P_s (n_1 T_s - TS_d - \xi) - q_s \quad (33)$$

$$\sum_{i=1}^{z_1} M_i \leq P (n_1 T - T_d - \varphi) - q \quad (34)$$

$$\sum_{i=1}^{z_1} MS_i \geq n_1 T_s \cdot DM_s - LS - q_s \quad (35)$$

$$\sum_{i=1}^{z_1} M_i \geq n_1 T \cdot \sum_{r=1}^R D_r - \sum_{r=1}^R LS_r - q \quad (36)$$

$$\frac{1}{P_s} \sum_{j=2}^i MS_j \leq \frac{1}{DM_s} \sum_{j=1}^{i-1} O_j - \frac{BL_s}{DM_s} \quad i = 2, \dots, z_1 \quad (37)$$

$$\frac{1}{P} \sum_{j=2}^i M_j \leq \frac{1}{\sum_{r=1}^R D_r} \sum_{j=1}^{i-1} \sum_{r=1}^R O_{rj} - \sum_{r=1}^R \frac{BL_r}{D_r} \quad i = 2, \dots, z_1 \quad (38)$$

$$I_s = I_{z_1} = 0 \quad (39)$$

$$IM_s = IM_{z_1} = 0 \quad (40)$$

$$O_{z_1} = V \quad (41)$$

$$O_{r_z} = V_r \quad r = 1, 2, \dots, R \quad (42)$$

$$n_1, n_r, z_1, z_r \in Z \quad (43)$$

رابطه (۳۲) و (۳۳) تضمین می‌کنند که میزان تأمین توسط تأمین‌کننده دچار اختلال شده در هر دوره از میزان تأمین در دوره‌های عادی کمتر می‌باشد. رابطه (۳۴) محدودیت ظرفیت تأمین‌کننده دچار اختلال شده را اعمال می‌کند و رابطه (۳۵) محدودیت ظرفیت تولیدکننده را در نظر می‌گیرد. در رابطه (۳۶) از این که کل مقدار تقاضای تولیدکننده در دوره بازیابی مدنظر قرار گرفته است، اطمینان حاصل می‌گردد و رابطه (۳۷) همین امر را در خصوص تقاضای خرده‌فروشان بررسی می‌کند. رابطه (۳۸) نشان می‌دهد که تولیدکننده سفارشات خود را به موقع تحویل می‌گیرد و دچار کمبود نمی‌شود. رابطه (۳۹) دریافت به موقع سفارشات خرده‌فروشان را بیان می‌کند. رابطه‌های (۴۰) و (۴۱) تضمین می‌کنند که در ابتدا و انتهای دوره بازیابی میزان موجودی در تأمین‌کننده و تولیدکننده صفر می‌باشد. روابط (۴۲) و (۴۳) نیز جهت حصول اطمینان از بازگشت سیستم به شرایط قبل از اختلال می‌باشد. رابطه (۴۴) نوع متغیرهای عدد صحیح را اعلام می‌کند.

#### ۴ روش حل پیشنهادی

طبق هشام‌الدین و دیگران، ۲۰۱۴ [۲۸] مدل بازیابی زنجیره‌تأمین دوسطحی یک مدل پیچیده می‌باشد که نیاز به روش‌های حل خاص برای آن می‌باشد پس می‌توان نتیجه گرفت مدل سه سطحی ارائه شده در این مقاله نیز یک مدل پیچیده برنامه‌ریزی عدد صحیح مختلط می‌باشد که نیاز به روش حل ابتکاری یا فراابتکاری برای حل آن می‌باشد. که در اینجا یک روش حل ابتکاری ارائه می‌گردد. قبل از ارائه روش حل، ذکر دو قضیه که بعداً از نتایج آنها استفاده خواهد شد، ضروری می‌باشد.

**قضیه ۱:** در صورتی که همه پارامترهای مدل ثابت باشند، در شرایط بهینه مقدار موجودی پایان دوره کلیه سطوح

$$I_i = 0, IM_i = 0 \quad \forall i$$

**اثبات:** برای اثبات رجوع شود به [۳۷]

**قضیه ۲:** حالت بهینه در این مدل در شرایطی رخ می‌دهد که

$$MS_i = O_i, M_i = \sum_{r=1}^R O_{ri} \quad \forall i$$

**اثبات:** با توجه به قضیه ۱ و تعریف  $I_i$  و  $IM_i$  طبق روابط (۲) و (۱۷) داریم:

$$\left. \begin{aligned} I_i &= I_{i-1} + MS_i - O_i \\ I_i &= I_{i-1} = 0 \end{aligned} \right\} \Rightarrow MS_i - O_i = 0 \Rightarrow MS_i = O_i$$

$$\left. \begin{aligned} IM_i &= IM_{i-1} + M_i - \sum_{r=1}^R O_{ri} \\ IM_i &= IM_{i-1} = 0 \end{aligned} \right\} \Rightarrow M_i - \sum_{r=1}^R O_{ri} = 0 \Rightarrow M_i = \sum_{r=1}^R O_{ri}$$

در واقع این قضیه، نتیجه قضیه ۱ می‌باشد. □

در روش حل ارائه شده از دو قضیه فوق استفاده خواهد شد. گام‌های این روش به صورت فلوجارت در شکل ۵ ترسیم شده است. ابتدا این مراحل را با پارامترهای مربوط به تامین کنندگان و تولیدکننده اجرا نموده و مقادیر بهینه را می‌یابیم. سپس همین مراحل را مجدداً با پارامترهای مربوط به تولیدکننده و خرده‌فروشان تکرار می‌کنیم و مقادیر متغیرها را به دست می‌آوریم.

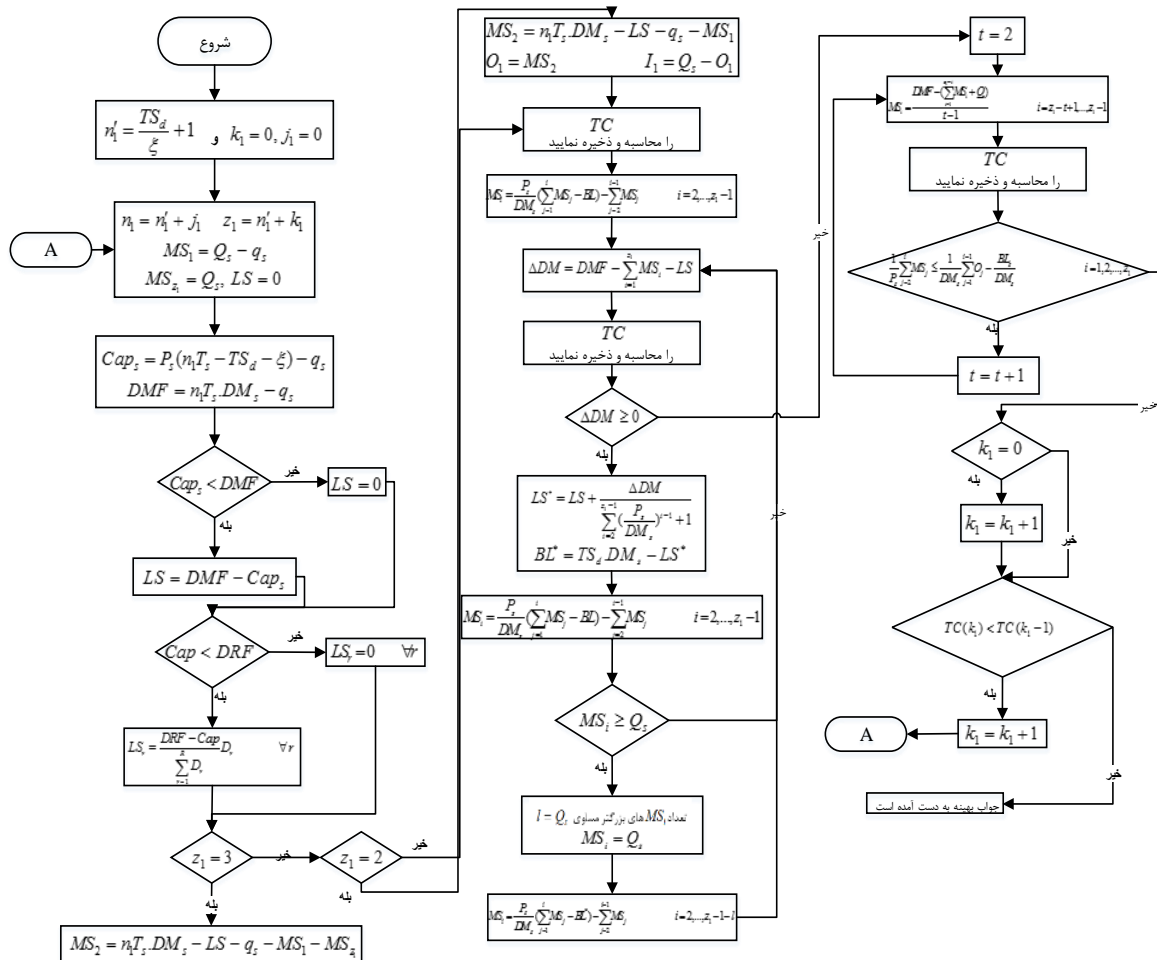
## ۵ مثال عددی

در این بخش جهت بررسی کاربردی بودن الگوریتم پیشنهادی برای حل مدل طراحی شده، یک زنجیره تامین با سه تامین کننده، یک تولیدکننده و سه خرده فروش را که مقادیر ورودی هر یک از پارامترهای این مساله نیز به شرح جدول ۲ می‌باشد در نظر می‌گیریم.

جدول ۲. پارامترهای ورودی مساله

| خرده فروشان |      |      | پارامترها | تولیدکننده | پارامترها | تامین کنندگان |      |      | پارامترها |
|-------------|------|------|-----------|------------|-----------|---------------|------|------|-----------|
| ۳           | ۲    | ۱    |           |            |           | ۳             | ۲    | ۱    |           |
| ۱۳۰۰        | ۱۰۰۰ | ۱۲۰۰ | $D_r$     | ۴۲۰۰       | $P$       | ۴۱۰۰          | ۳۷۰۰ | ۴۰۰۰ | $P_s$     |
|             |      |      |           |            |           | ۳۵۰۰          | ۳۵۰۰ | ۳۵۰۰ | $DM_s$    |

مدل را برای ۲۰۰ مثال با داده‌های تصادفی حل کرده‌ایم. این مسایل آزمایشی با تولید داده‌های تصادفی برای پارامترهای هزینه‌ای، مقدار تامین قبل از وقوع اختلال و طول دوره اختلال ایجاد گردیده‌اند که در جدول شماره ۳ بازه پارامترهای تصادفی آمده است:



شکل ۵. فلوچارت الگوریتم حل ابتکاری

جدول ۳. بازه پارامترها جهت تولید داده‌های تصادفی

| خرده فروشان |          |         | پارامترها | تولید کننده | پارامترها | تامین کنندگان |           |              | پارامترها |
|-------------|----------|---------|-----------|-------------|-----------|---------------|-----------|--------------|-----------|
| ۳           | ۲        | ۱       |           |             |           | ۳             | ۲         | ۱            |           |
| [۸.۵۰]      | [۱۵.۶۰]  | [۱۰.۷۰] | $A_r$     | [۲۰۰.۵۰۰]   | $AS$      | [۱۵۰.۶۰۰]     | [۲۰۰.۵۰۰] | [۱۰۰.۴۵۰]    | $A_s$     |
|             |          |         |           |             |           | [۱۵۰.۶۰۰]     | [۲۰۰.۵۰۰] | [۱۰۰.۴۵۰]    | $AO_s$    |
| [۲.۱۰]      | [۱.۸]    | [۲.۷]   | $H_r$     | [۴.۱۰]      | $H$       | [۱.۸]         | [۵.۱۲]    | [۳.۱۵]       | $H_s$     |
|             |          |         |           |             |           | [۱.۸]         | [۵.۱۲]    | [۳.۱۵]       | $HM_s$    |
| [۸.۶۰]      | [۱۵.۸۰]  | [۱۰.۷۰] | $B_r$     | [۷.۸۰]      | $BM$      | [۱۰.۱۰۰]      | [۸.۷۰]    | [۵.۸۰]       | $B_s$     |
|             |          |         |           |             |           | [۱۰.۱۰۰]      | [۸.۷۰]    | [۵.۸۰]       | $BM_s$    |
| [۳۰.۷۰]     | [۴۰.۱۰۰] | [۴۰.۹۰] | $L_r$     | [۳۰.۱۰۰]    | $LM$      | [۳۰.۱۵۰]      | [۲۵.۱۱۰]  | [۲۰.۱۰۰]     | $L_s$     |
|             |          |         |           |             |           | [۳۰.۱۵۰]      | [۲۵.۱۱۰]  | [۲۰.۱۰۰]     | $LM_s$    |
|             |          |         |           |             |           |               |           | $[\xi, T_s]$ | $TS_d$    |
|             |          |         |           |             |           |               |           | $[Q_s]$      | $q_s$     |

همچنین جهت ارزیابی کیفیت جواب‌های به دست آمده، مدل ارزیابی شده توسط نرم افزار GAMS 24 نیز حل گردید که مقایسه چند مثال حل شده از دو روش در جدول ۴ ارائه شده است:

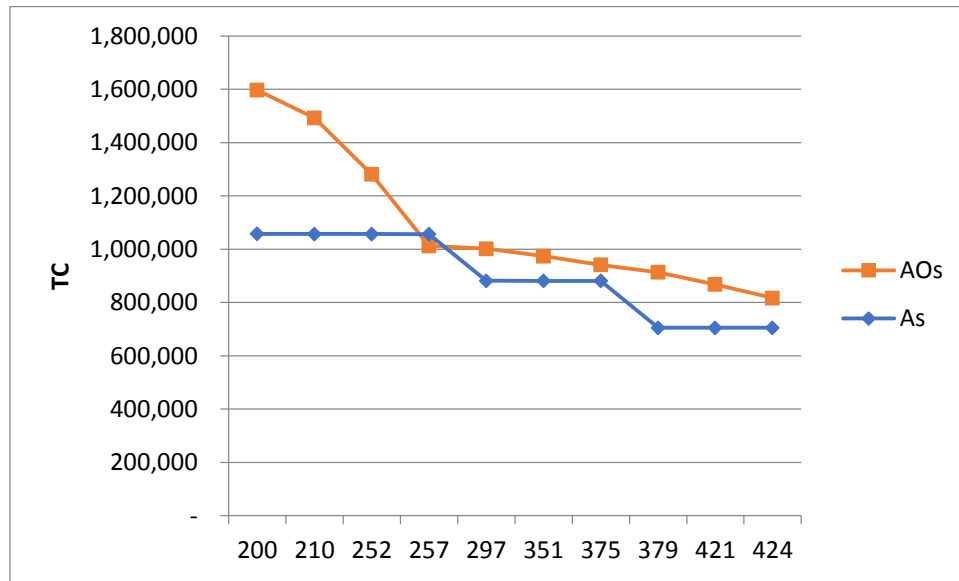
جدول ۴. مقادیر پارامترها و جواب ۱۰ مساله تصادفی

| شماره | $A_s$ | $AO_s$ | $H_s$ | $HM_s$ | $B_s$ | $BM_s$ | $L_s$ | $LM_s$ | $TS_d$ | $q_s$ | $n_1$ | $n_2$ | $n_3$ | $z_1$ | $z_2$ | $TC$       | $TC_{GAMS}$ | درصد انحراف |
|-------|-------|--------|-------|--------|-------|--------|-------|--------|--------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|------------|-------------|-------------|
| ۱     | ۴۱۵   | ۳۸۰    | ۴     | ۹      | ۷۹    | ۷۵     | ۴۹    | ۴۸     | -۰.۰۳۸ | ۳۷۸   | ۳     | ۴     | ۴     | ۸     | ۵     | ۱۵۲۱۸۴۷/۴۵ | ۱۵۲۱۸۴۷/۲۲  | ٪۰.۰۰۰۰۲    |
| ۲     | ۲۴۳   | ۲۵۵    | ۴     | ۱۵     | ۶۰    | ۶۲     | ۳۱    | ۸۴     | -۰.۰۸۹ | ۳۰۹   | ۴     | ۶     | ۴     | ۹     | ۱۲    | ۱۵۳۱۵۳۲/۷۲ | ۱۵۳۱۵۳۲/۸۲  | ٪۰.۰۰۰۰۶    |
| ۳     | ۲۰۸   | ۲۵۲    | ۱۱    | ۱۵     | ۵۰    | ۶۵     | ۸۱    | ۴۶     | -۰.۰۰۵ | ۶۹    | ۳     | ۶     | ۶     | ۴     | ۱۳    | ۱۵۱۲۸۹۵/۵۳ | ۱۵۱۲۸۹۵/۲۸  | ٪۰.۰۰۰۰۵    |
| ۴     | ۱۱۰   | ۴۰۴    | ۳     | ۱۰     | ۲۰    | ۴۷     | ۵۵    | ۳۵     | -۰.۰۳۹ | ۳۵۷   | ۳     | ۶     | ۶     | ۶     | ۸     | ۲۴۲۴۶۱۶/۴  | ۲۴۲۴۶۱۶/۴۲  | ٪۰.۰۰۰۰۰    |
| ۵     | ۳۰۳   | ۲۰۹    | ۷     | ۹      | ۴۹    | ۲۱     | ۵۹    | ۹۷     | -۰.۰۹۲ | ۲۹۹   | ۵     | ۸     | ۵     | ۶     | ۱۵    | ۱۶۷۳۶۴۹/۸۵ | ۱۶۷۳۶۴۹/۴۴  | ٪۰.۰۰۰۰۲    |
| ۶     | ۳۳۳   | ۴۲۶    | ۸     | ۱۴     | ۲۵    | ۷۳     | ۶۹    | ۷۸     | -۰.۰۸۹ | ۱۷۷   | ۴     | ۵     | ۵     | ۵     | ۱۲    | ۲۱۳۱۷۰۵/۲۸ | ۲۱۳۱۷۰۵/۰۴  | ٪۰.۰۰۰۰۴    |
| ۷     | ۲۸۸   | ۲۱۱    | ۱۰    | ۱۱     | ۱۳    | ۲۰     | ۷۵    | ۱۰۰    | -۰.۰۲۲ | ۱۵۱   | ۲     | ۳     | ۲     | ۵     | ۷     | ۶۳۳۶۸۱/۲۵  | ۶۳۳۶۸۱/۲۷   | ٪۰.۰۰۰۰۰    |
| ۸     | ۲۴۹   | ۲۳۱    | ۵     | ۷      | ۳۹    | ۶      | ۵۵    | ۶۶     | -۰.۰۰۵ | ۳۴۹   | ۳     | ۵     | ۳     | ۷     | ۱۰    | ۱۱۵۵۷۹۴/۵  | ۱۱۵۵۷۹۴     | ٪۰.۰۰۰۰۴    |
| ۹     | ۱۷۹   | ۱۴۹    | ۶     | ۱۵     | ۳۳    | ۶۰     | ۴۷    | ۶۷     | -۰.۰۱۹ | ۳۴۰   | ۲     | ۴     | ۴     | ۴     | ۶     | ۵۹۶۶۰۰/۸۲  | ۵۹۶۶۰۰/۷۸   | ٪۰.۰۰۰۰۱۶   |
| ۱۰    | ۱۳۹   | ۴۰۱    | ۵     | ۱۲     | ۱۱    | ۷۲     | ۹۶    | ۵۳     | -۰.۰۰۸ | ۱۵۸   | ۴     | ۷     | ۴     | ۵     | ۸     | ۲۸۰۷۹۲۳/۶۸ | ۲۸۰۷۹۲۳/۱۱  | ٪۰.۰۰۰۰۲    |

اختلاف مقادیر به دست آمده در دو روش در حد اختلاف در یک رقم سمت راست می باشد که نشان می دهد پاسخها مناسب می باشند، همچنین درصد انحراف پاسخهای به دست آمده از دو روش نیز در آخرین ستون جدول ۵ نشان داده شده است.

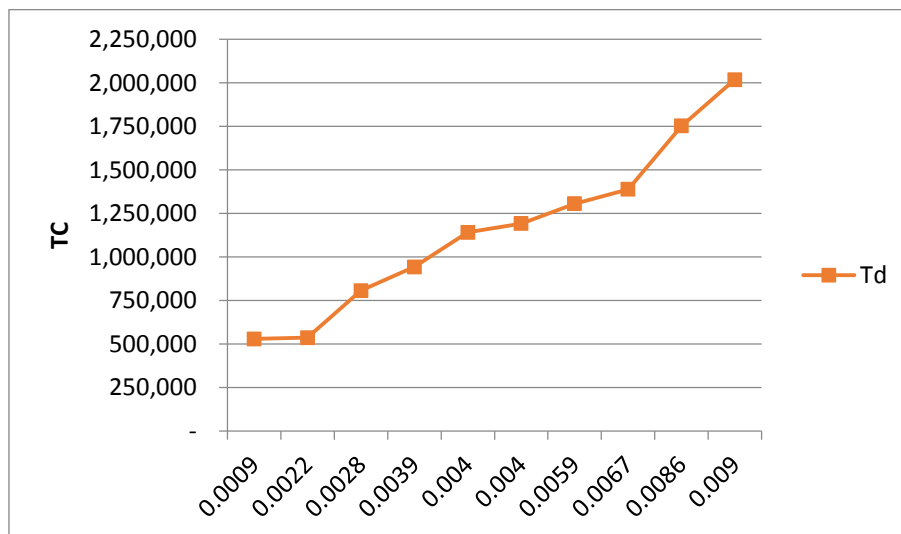
جهت تحلیل حساسیت نیز از نمونه‌های مناسب از مسایل تصادفی تولید شده که در بالا توصیف گردید استفاده شده است به طوری که کلیه پارامترها روی مقدار وسط بازه تعریف شده ثابت فرض گردیده و تغییرات متغیر مورد بررسی ترسیم شد که نتایج قابل تاملی را در پی داشت.

همان‌طور که در شکل ۶ دیده می‌شود با افزایش هزینه ثابت راه اندازی تامین‌کننده‌ای که دچار اختلال گردیده است، هزینه بازیابی کل کاهش می‌یابد که شیب این کاهش در ابتدا بیشتر بوده و در نهایت به تغییرات بسیار اندکی در هزینه کل ختم می‌گردد. همچنین با افزایش هزینه سفارش‌دهی تولیدکننده به تامین‌کننده دچار اختلال‌شده، هزینه بازیابی کل کاهش می‌یابد. علت این رفتار می‌تواند کاهش تعداد دوره های زمانی بازیابی در اثر افزایش هزینه‌های ثابت باشد.



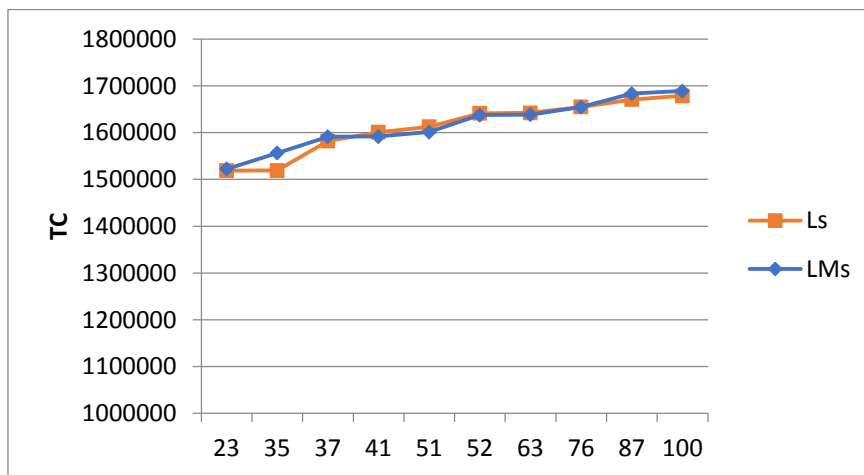
شکل ۶. تغییرات هزینه بازیابی کل براساس تغییرات هزینه راه‌اندازی تامین‌کننده مختل شده و هزینه ثابت سفارش‌دهی تولیدکننده به آن

وضعیت تغییرات هزینه کل بازیابی زنجیره‌تامین با توجه به طول دوره زمانی اختلال، در شکل ۷ نشان داده شده است. در صورت افزایش زمان اختلال که حاکی از وسعت اختلال به وجود آمده می‌باشد، هزینه‌های بازیابی یا به‌عبارت دیگر جبران با شیب قابل توجهی افزایش می‌یابد که این نتیجه بدیهی و قابل پیش‌بینی نیز می‌باشد.



شکل ۷. تغییرات هزینه بازیابی کل براساس تغییرات طول دوره اختلال

تغییر قابل توجه دیگری که در این بخش مورد بررسی قرار گرفته است مربوط به تغییرات هزینه بازیابی کل در اثر تغییر هزینه فروش از دست رفته تولیدکننده و تامین کننده مربوطه می باشد. همان طور که در شکل ۸ ملاحظه می شود با افزایش هزینه های فروش از دست رفته، هزینه کل نیز افزایش می یابد؛ اما شیب این نمودار ملایم است علت این امر می تواند رجحان پس افت تقاضا بر فروش از دست رفته باشد که با توجه به مفروضات مساله مبنی بر وجود ظرفیت خالی و کمتر بودن هزینه پس افت تقاضا از فروش از دست رفته باشد.



شکل ۸. تغییرات هزینه بازیابی کل بر اساس تغییرات هزینه فروش از دست رفته

## ۶ نتیجه گیری و پیشنهاد تحقیقات آتی

در مقاله حاضر، یک مدل برنامه ریزی بازیابی زنجیره تامین سه سطحی پس از وقوع اختلال تامین ارایه گردید که با توجه به غیرقابل پیش بینی بودن برخی حوادث در شرکت های تولیدی، می تواند کاربردهای فراوانی در صنعت داشته باشد. هدف اصلی این پژوهش کمک به تصمیم گیری و بازنگری برنامه های تامین، تولید و سفارش دهی در زنجیره تامین به محض وقوع اختلال می باشد به گونه ای که هزینه های کل زنجیره تامین برای بازگشت سیستم به حالت قبل از وقوع اختلال کمینه گردد. مدل طراحی شده یک مدل ریاضی برنامه ریزی عدد صحیح مختلط می باشد که با الگوریتم ابتکاری پیشنهادی حل شده است و جهت ارزیابی صحت نتایج و کاربردی بودن روش پیشنهادی، برای مسایل کوچک، مدل هم زمان با نرم افزار GAMS نیز اجرا گردید و نتایج برای ۲۰۰ مساله تصادفی که با داده های تصادفی تولید گردیده است مورد مقایسه قرار گرفت و درصد انحراف جواب نهایی در این دو روش نشان می دهد الگوریتم پیشنهادی قابل پذیرش می باشد.

با توجه به نتایج حاصل از مطالعه انجام شده به مدیران شرکت های صنعتی توصیه می گردد در صورت وقوع اختلال در زنجیره تامین خود، در کنار اجرای اقدامات اصلاحی در راستای رفع مشکل به وجود آمده، به صورت موازی تیم برنامه ریزی بازیابی نیز تشکیل داده و به صورت یکپارچه و در کل زنجیره تامین به بازنگری و اخذ

تصمیمات اجرایی در خصوص میزان و نحوه تولید و ارسال کالاها در طول زنجیره تامین پیردازند تا بتوانند آثار اختلال رخ داده را کمینه نمایند.

همچنین پیشنهاد می‌گردد در قراردادهای تامین، تولید و توزیع که در زنجیره‌های تامین منعقد می‌گردد به شرایط غیرقابل پیش‌بینی توجه شده و مسئولیت، تعهدات و اختیارات هر یک از اعضا در این شرایط تعیین گردد تا در صورت وقوع حادثه‌ای بتوان با احتساب این موارد، در برنامه‌های زنجیره‌تأمین بازنگری نمود.

مدل ارایه شده در تحقیق حاضر، برنامه‌ریزی بازیابی در صورت وقوع اختلال در تامین کننده را مورد مطالعه قرار داده است که پیشنهاد می‌گردد در تحقیقات آتی اختلال در دیگر قسمت‌های زنجیره‌تأمین اعم از تولیدکننده و خرده‌فروشان و همچنین سیستم حمل و نقل بین حلقه‌های زنجیره مورد مطالعه و مدل‌سازی قرار گیرد. موضوع قابل توجهی که می‌تواند در پژوهش‌های بعدی مدنظر قرار گیرد وقوع هم‌زمان اختلال در چند قسمت زنجیره‌تأمین و یا وقوع اختلال در دوره زمانی بازیابی یک اختلال باشد که مورد توجه نویسندگان این مقاله نیز می‌باشد.

## منابع

- [1] Sheffi, Y. (2005). *The resilient enterprise: overcoming vulnerability for competitive advantage*. MIT Press Books, 1 .
- [2] Chen, J., Wang, H., & Zhong, R. Y. (2021). A supply chain disruption recovery strategy considering product change under COVID-19. *Journal of Manufacturing Systems*, 60, 920-927 .
- [3] Apte, U., Ferrer, G., Lewis, I., & Rendon, R. (2006). *Managing the service supply chain in the Department of Defense: Opportunities and challenges*. Retrieved from DTIC Document .
- [4] Tang, C., & Tomlin, B. (2008). The power of flexibility for mitigating supply chain risks. *International Journal of Production Economics*, 116(1), 12-27 .
- [5] Orlando, B., Tortora, D., Pezzi, A., & Bitbol-Saba, N. (2022). The disruption of the international supply chain: Firm resilience and knowledge preparedness to tackle the COVID-19 outbreak. *Journal of International Management*, 28(1), 100876 .
- [6] Khan, S. A. R., Waqas, M., Honggang, X., Ahmad, N., & Yu, Z. (2022). Adoption of innovative strategies to mitigate supply chain disruption: COVID-19 pandemic. *Operations Management Research*, 1-19 .
- [7] Chen, I. J., & Paulraj, A. (2004). Towards a theory of supply chain management: the constructs and measurements. *Journal of operations management*, 22(2), 119-150 .
- [8] Davis, S., Gerstner, E., & Hagerty, M. (1995). Money back guarantees in retailing: Matching products to consumer tastes. *Journal of Retailing*, 71(1), 7-22 .
- [9] Sodhi, M. S. (2005). Managing demand risk in tactical supply chain planning for a global consumer electronics company. *Production and Operations Management*, 14(1), 69-79 .
- [10] Zsidisin, G. A. (2003). Managerial perceptions of supply risk. *Journal of Supply Chain Management*, 39(1), 14-26 .
- [11] Salahi, F., Radfar, R., Toloie Shlaghi, A., & Alborzi, M. (2019). Design of Multi-Objective Model for Disruption Risk Assessment of Supply Chain Using Combined Genetic Algorithm and Simulated Annealing. *Journal of Operational Research in Its Applications*, 16(4), 19 .
- [12] Pfeffer, J., & Salancik, G. R. (1978). *The external control of organisations*. New York .
- [13] Zsidisin, G. A., Panelli, A., & Upton, R. (2000). Purchasing organization involvement in risk assessments, contingency plans, and risk management: an exploratory study. *Supply Chain Management: An International Journal*, 5(4), 187-198 .
- [14] Zsidisin\*, G. A., Melnyk, S. A., & Ragatz, G. L. (۲۰۰۵). An institutional theory perspective of business continuity planning for purchasing and supply management. *International journal of production research*, 43(16), 3401-3420 .

- [15] Bui, T.-D., Tsai, F. M., Tseng, M.-L., Tan, R. R., Yu, K. D. S., & Lim, M. K. (2021). Sustainable supply chain management towards disruption and organizational ambidexterity: A data driven analysis. *Sustainable production and consumption*, 26, 373-410 .
- [16] Rice, J. B., & Caniato, F. (2003). BUILDING A SECURE AND RESILIENT SUPPLY NETWORK. *SUPPLY CHAIN MANAGEMENT REVIEW*, V. 7, NO. 5 (SEPT./OCT. 2003), P. 22-30: ILL .
- [17] Mitroff, I. I., & Alpaslan, M. C. (2003). *Preparing for evil*: Harvard Business School Pub.
- [18] Hillman, M. (2006). Strategies for managing supply chain risk. *Supply Chain Management Review*, 10(5), 11-13 .
- [19] Rodetis, S. (1999). Can Your Business Survive the Unexpected? *Journal of Accountancy*, 187, 27-34 .
- [20] Waller, M., Johnson, M. E., & Davis, T. (1999). Vendor-managed inventory in the retail supply chain. *Journal of Business Logistics*, 20, 183-204 .
- [21] Zinn, W., & Charnes, J. M. (2005). A comparison of the economic order quantity and quick response inventory replenishment methods. *Journal of Business Logistics*, 26(2), 119-141 .
- [22] Taghizadeh, N., Naseri, H., & Moradi, S. (2012). Scheduling multi-product pipeline under daily customers demand uncertainty. *Journal of Operational Research in Its Applications*, 9(1).
- [23] Chopra, S., & Sodhi, M. S. (2004). Supply-chain breakdown. *MIT Sloan Management Review* .
- [24] Chen ,L.-M., Liu, Y. E., & Yang, S.-J. S. (2015). Robust supply chain strategies for recovering from unanticipated disasters. *Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review*, 77, 198-214 .
- [25] Eisenstein, D. D. (2005). Recovering cyclic schedules using dynamic produce-up-to policies. *Operations research*, 53(4), 675-688 .
- [26] Gallego, G. (1994). When is a base stock policy optimal in recovering disrupted cyclic schedules? *Naval Research Logistics (NRL)*, 41(3), 317-333 .
- [27] Hishamuddin, H., Sarker, R. A., & Essam, D. (2012). A disruption recovery model for a single stage production-inventory system. *European Journal of Operational Research*, 222(3), 464-47 .
- [28] Hishamuddin, H., Sarker, R. A., & Essam, D. (2014). A recovery mechanism for a two echelon supply chain system under supply disruption. *Economic Modelling*, 38, 555-563 .
- [29] Paul, S. K., Sarker, R., & Essam, D. (2014). Managing real-time demand fluctuation under a supplier-retailer coordinated system. *International Journal of Production Economics*, 158, 231-243 .
- [30] Paul, S. K., Sarker, R., & Essam, D. (2013). A disruption recovery model in a production-inventory system with demand uncertainty and process reliability. In *Computer Information Systems and Industrial Management* (pp. 511-522): Springer.
- [31] Paul, S. K., Sarker, R., & Essam, D. (2014). Real time disruption management for a two-stage batch production-inventory system with reliability considerations. *European Journal of Operational Research*, 237(1), 113-128 .
- [32] Paul, S. K., Sarker, R., & Essam, D. (2015). Managing disruption in an imperfect production-inventory system. *Computers & Industrial Engineering*, 84, 101-112 .
- [33] Paul, S. K., Sarker, R., & Essam, D. (2015). A disruption recovery plan in a three-stage production-inventory system. *Computers & Operations Research*, 57, 60-72 .
- [34] Qi, X., Bard, J. F., & Yu, G. (2004). Supply chain coordination with demand disruptions. *Omega*, 32(4), 301-312 .
- [35] Shao, X.-F., & Dong, M. (2012). Supply disruption and reactive strategies in an assemble-to-order supply chain with time-sensitive demand. *IEEE Transactions on engineering management*, 59(2), 201-212 .
- [36] Tang, L. C., & Lee, L. H. (2005). A simple recovery strategy for economic lot scheduling problem: A two-product case. *International Journal of Production Economics*, 98(1), 97-107 .
- [37] Xia, Y., Yang, M.-H., Golany, B., Gilbert, S. M., & Yu, G. (2004). Real-time disruption management in a two-stage production and inventory system. *IIE transactions*, 36(2), 111-125 .