

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

فاطمه قاسم زاده گوری^{۱*}، لعیا الفت^۲، مقصود امیری^۳، ابراهیم تیموری^۴

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 ارایه مدل برنامه‌ریزی بازیابی پس از وقوع اختلال پرداخته شده است. مدل ارایه شده با هدف کمینه‌سازی هزینه بازیابی یک زنجیره تامین سه سطحی شامل چندین 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 مدل سازی 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 ارایه 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

جهانی سازی اقتصاد و رشد برون‌سپاری، زنجیره‌های تامین را پیچیده‌تر و واپس‌های تر کرده است و در بسیاری صنایع، زنجیره‌های تامین به علت کمبود ظرفیت‌های پشتیبانی، در معرض ریسک‌های بزرگی قرار گرفته‌اند که تاکنون بی‌سابقه 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 زنجیره‌تامین وجود دارد که برخی از آن‌ها عبارتند از: شرکت اریکسون به دلیل آسیب تسهیلات تولیدی تامین کنندگان نیمه هادی در طی آتش سوزی سال ۲۰۰۰، حدود ۴۰۰ میلیون یورو زیان دید، کارخانه Land Rover به دلیل ورشکستگی تامین کنندگان 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.^[۶-۴]

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

نوع تحقیق از منظر هدف، توسعه‌ای-کاربردی می‌باشد و از آنجا که به دنبال ارایه مدل برنامه‌ریزی ریاضی جهت مدیریت اختلالات تامین در زنجیره‌تامین سه سطحی می‌باشد توسعه‌ای است، بررسی‌های انجام شده 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 پرداخته شده، 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 ارایه شده است.

۲ مرور ادبیات

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

² 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 یافتد^[۱۰-۷]. صلاحی^[۱۱] در پژوهشی به ارزیابی و رتبه‌بندی اختلالات زنجیره‌تامین پرداخته و نشان داد که بحرانی ترین اختلال‌ها، اختلال مربوط به بلایای طبیعی است.

همچنان که وابستگی و ارتباطات متقابل اعضاء زنجیره برای رفع نیازمندی‌ها افزایش می‌یابد، این امر تعداد و نوع حوادث بالقوه برای شرکت‌ها را بیشتر می‌کند^[۱۲]. همزمان با تغییرات یادشده، زنجیره‌های تامین تکنیک‌های جدیدی نظیر سیستم‌های ناب^۳ و Jit را تجربه می‌کنند که این شیوه‌ها مبتنی بر روابط تنگاتنگ تولید‌کننده و تامین‌کننده 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 تامین شده است^[۱۴]، تلاش‌های صورت گرفته برای ایجاد زنجیره‌های تامین با کارایی بالاتر و هزینه‌های پایین‌تر ممکن است به نتایج پیش‌بینی نشده‌ای منجر شود که ریسک وقوع بی‌نظمی و ایجاد وقفه در زنجیره‌تامین را بالا برده و یا باعث گسترش شدت اثر حوادث می‌شود^[۱۵].

اگرچه اختلال‌ها می‌توانند در چندین شرکت بروز نمایند، اما وابستگی‌های متقابل میان شرکت‌ها سبب گسترش و تسربی اختلال به سایر اعضاء می‌شود. بنابراین هنگامی که حادثه‌ای در سایر بخش‌های زنجیره‌تامین اتفاق بیفت، چه بسا سایر اعضاء برای اختلال در جریان کالاهای خود مستعد می‌شوند. بنابراین شرکت‌ها باید زنجیره‌تامینی ایجاد نمایند که اولاً این باشد (کاهش احتمال یا کاهش تاثیر حوادث) و ثانیاً قابل ارتعاج باشد (توانایی انطباق، پاسخگویی و بهبود هنگام وقوع حادثه) تا اثر کل حادثی که به اختلال می‌انجامد، در زنجیره‌تامین به حداقل برسد^[۱۶،۱]. اما مطالعات اخیر نشان می‌دهد که تنها ۲۵٪ - ۵٪ شرکت‌هایی که جزو ۵۰۰ Fortune می‌باشند به طور رسمی خود را برای بحران‌ها و اختلال‌های جدی آماده می‌کنند^[۱۷] و کمتر از ۲۰٪ شرکت‌ها شبکه تامین 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 زنجیره‌تامین مورد توجه قرار گرفته‌اند. برای اداره‌ی اثر متقابل ریسک‌های عرضه و تقاضا، روش‌هایی مانند Jit، مدیریت موجودی توسط فروشنده (VMI) و بازپرسازی مستمر^۴ (که سریعاً جواب می‌دادند) گسترش یافته‌اند^[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.

^۳-Lean production

^۴-Continuous replenishment

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

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

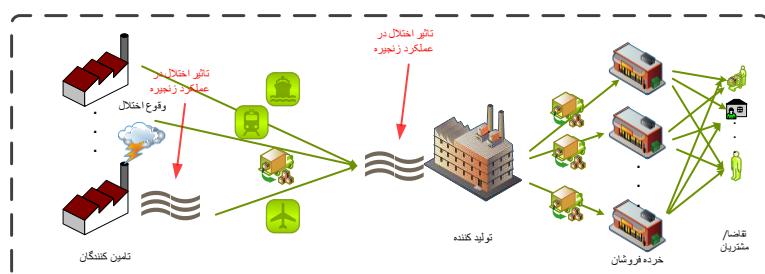
در تحقیق حاضر به ارایه مدل یکپارچه در زنجیره تامین سه سطحی شامل تامین کننده، تولید کننده و خردۀ فروشان با در نظر گرفتن شرایط اختلال در تامین کننده می‌پردازد و حل مدل ارایه شده توسط الگوریتم ابتکاری پیشنهادی صورت می‌گیرد. با توجه به بررسی‌هایی که بر روی مطالعات و تحقیقات قبلی صورت گرفته است، می‌توان به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

- در این تحقیق مدل بازیابی زنجیره تامین 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 زنجیره تامین پس از وقوع اختلال، در ادبیات موضوع دارای نوآوری می‌باشد.
- در مدل طراحی شده، وضعیت همه اجزای زنجیره تامین در صورت وقوع اختلال در یک جزء، 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 مدل‌سازی مساله

زنجیره تامین مورد بررسی شامل چند تامین‌کننده مواد اولیه، یک تولیدکننده و چند خرده‌فروش 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 سهل‌انگاری انسانی باشد، دچار انحراف از برنامه در کل یا بخشی از زنجیره شده است و در برنامه بازیابی سعی بر آن است که با برنامه‌ریزی 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 تامین‌کنندگان، توقف تولید در تولیدکننده را موجب می‌شود در حالی که بقیه تامین‌کنندگان 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 افتاد که موجودی انباسته 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 برآن است که پس از وقوع اختلال در یک تامین‌کننده، میزان سفارشات، تولید و انتقال کالا بین حلقوه‌های مختلف زنجیره تامین را به گونه‌ای تعیین نماییم که هزینه‌های دوره بازیابی کمینه گردد. طول دوره بازیابی محدود و هزینه‌های بازیابی شامل هزینه‌های اینبارداری، تولید، سفارش گذاری، حمل و نقل بین حلقوه‌های مختلف زنجیره، هزینه‌های فروش از دست رفته و پس افت تقاضا می‌باشند. مفروضات زیر در مدل‌سازی 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.
- زنجیره‌تامین 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 تأخیر 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 زنجیره‌تامین 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 گستره 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.

۱-۳ 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 نگهداری 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 خرد فروش r	A_r	هزینه ثابت سفارش دهی خرد 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 خرد 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 خرد فروش r در شرایط عادی	V	اندازه سفارش تولید کننده در شرایط عادی
BL_r	مقدار پس افت تقاضا در خرد فروش r	BL	مقدار پس افت تقاضا در تولید کننده
LS_r	مقدار فروش از دست رفته در خرد 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
ζ	زمان بیکاری تولید در تامین کننده در شرایط عادی	ρ	زمان فعالیت تولید در تامین کننده در شرایط عادی
T_s	طول یک دوره تولید در تامین کننده s در شرایط عادی	φ	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 خرد 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 تقاضا محصول در خرد 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 خرد 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 خرد 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

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

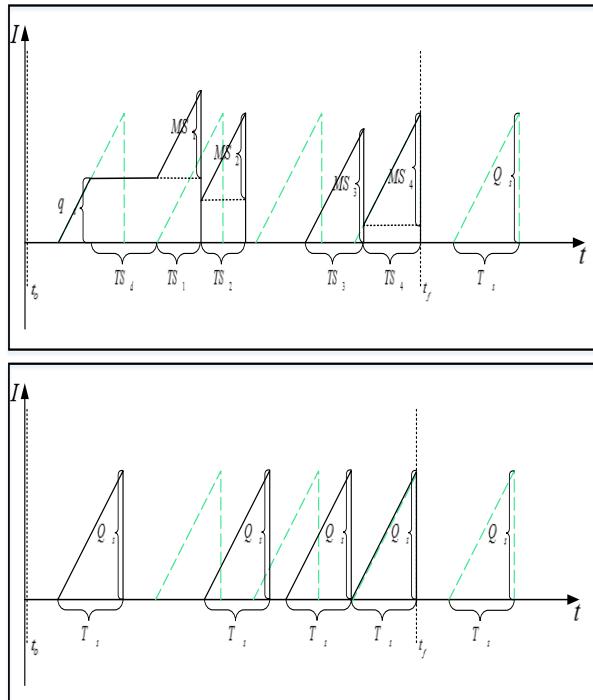
۲-۳ توابع هزینه مدل

هزینه‌های مرتبط با تامین کننده‌ای که دچار اختلال شده است در دوره بازیابی عبارتند از: هزینه راه اندازی، نگهداری 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 کننده‌گان

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]:

$$\begin{aligned} HC_s &= H_s \left(\frac{1}{2} q_s \cdot \frac{q_s}{P_s} + q_s \cdot TS_d + I_1 \cdot TS_1 + \frac{1}{2} MS_1 \cdot TS_1 + I_2 \cdot TS_2 + \frac{1}{2} MS_2 \cdot TS_2 + I_3 \cdot TS_3 + \frac{1}{2} MS_3 \cdot TS_3 + \dots \right) \\ &= H_s \left(\frac{1}{2} q_s + q_s \cdot TS_d + \left(I_1 + \frac{1}{2} MS_1 \right) TS_1 + \left(I_2 + \frac{1}{2} MS_2 \right) TS_2 + \left(I_3 + \frac{1}{2} MS_3 \right) TS_3 + \dots \right) \\ &= H_s \left(\frac{1}{2} q_s + q_s \cdot TS_d + \left(I_1 + \frac{1}{2} MS_1 \right) \frac{MS_1}{P_s} + \left(I_2 + \frac{1}{2} MS_2 \right) \frac{MS_2}{P_s} + \left(I_3 + \frac{1}{2} MS_3 \right) \frac{MS_3}{P_s} + \dots \right) \\ &= H_s \left(\frac{1}{2} q_s + q_s \cdot TS_d + \sum_{i=1}^z \left(I_{i-1} + \frac{1}{2} MS_i \right) \frac{MS_i}{P_s} \right) \end{aligned} \quad (3)$$

برای میزان کمبود موجودی که بر اثر این اختلال تامین، در تولیدکننده رخ خواهد داد، تولیدکننده متتحمل 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 پس افت 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 دوره‌های بازیابی تامین می‌گردد و بخشی از آن نیز تامین خواهد شد، مقدار تامین شده با تأخیر را پس افت 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:

$$LS = nV - q_s - \sum_{i=1}^{z-1} O_i \quad (4)$$

و مقدار پس افت 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 پس افت تقاضا و فروش از دست رفته داریم:

$$BLC_s = B_s \cdot \left(\xi + \frac{q_s}{P_s} + TS_d + \frac{MS_1}{P_s} - \frac{V}{P} \right) \cdot \frac{BL}{2} \quad (6)$$

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

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

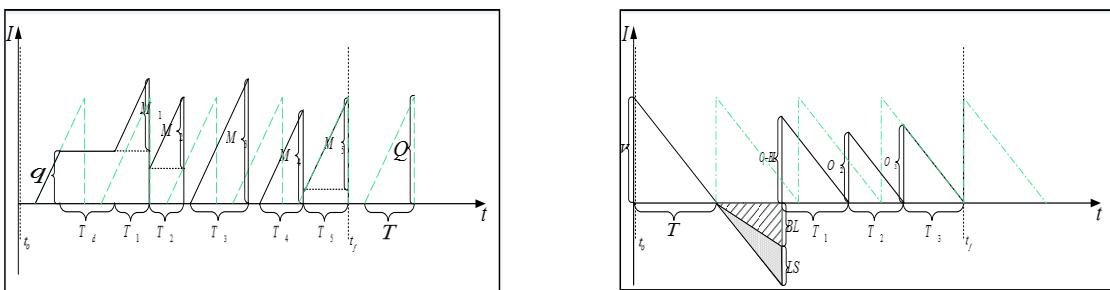
$$TC_s = FCS_s + HC_s + BLC_s + LSC_s \quad (8)$$

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

$$TC_s' = \sum_{s=1}^S (A_s z_1 + \frac{H_s}{2} T_s Q_s z_1) \quad (9)$$

هزینه‌های مرتبط با تامین مواد اولیه تولیدکننده در دوره بازیابی این اختلال عبارتند از: هزینه سفارش‌دهی، نگهداری موجودی، پس افت 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 تولیدکننده (سمت چپ محصول و سمت راست مواد اولیه)

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

$$\begin{aligned} HCM_1 &= \frac{1}{2} HM_s (V \frac{P}{P} + (O_1 - BL)T_1 + O_2 T_2 + O_3 T_3 + \dots) \\ &= \frac{1}{2} HM_s (\frac{V}{P} + (O_1 - BL) \frac{(O_1 - BL)}{P} + O_2 \frac{O_1}{P} + O_3 \frac{O_2}{P} + \dots) \\ &= \frac{HM_s}{2P} (V + (O_1 - BL) + O_2 + O_3 + \dots) \\ &= \frac{HM_s}{2P} (V + (O_1 - BL) + \sum_{i=2}^{z_1-1} O_i) \end{aligned} \quad (11)$$

هزینه‌های کمبود شامل فروش از دست رفته و پس افت تقاضا نیز همچون مواردی که در قسمت هزینه‌های تامین کننده درج گردید، محاسبه می‌شود:

$$BLC_{M_1} = BM_s \cdot (\xi + \frac{q_s}{P_s} + TS_d + \frac{MS_1}{P_s} - \frac{V}{P}) \cdot \frac{BL}{2} \quad (12)$$

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

با استفاده از روابط ۱۰-۱۳، تابع هزینه تولیدکننده در ارتباط با تامین کننده دچار اختلال شده، در دوره بازیابی اختلال تامین کننده 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 می‌شود زمان ارسال محموله‌های بعدی این تامین کنندگان نیز بازنگری می‌گردد و تابع هزینه سفارش دهی تولید کننده به تامین کنندگان دیگر که دچار اختلال نشده‌اند به شرح زیر تغییر می‌یابد:

$$TCM'_d = \sum_{s=1}^S (AO_s.z_s + \frac{HM_s}{2} T_s Q_s z_s + HM_s Q_s TS_d) \quad (15)$$

همان‌طور 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 می‌کند. هزینه‌های مرتبط با تولید کننده در دوره بازیابی عبارتند از: هزینه راه‌اندازی، نگهداری موجودی، پس افت تقاضا و فروش از دست رفته. هزینه راه‌اندازی از فرمول زیر محاسبه می‌شود:

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

IM_i را به عنوان سطح موجودی در پایان دوره i ام تعریف می‌کنیم 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 بازیابی، میزان موجودی را نشان می‌دهد پس داریم:

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

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 می‌شود که از فرمول زیر محاسبه می‌گردد:

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

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

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

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

$$BLC_R = BM \sum_{r=1}^R (\varphi + \frac{q}{P} + T_d + \frac{M_1}{P} - \frac{V_r}{D_r}) \cdot \frac{BL_r}{2} \quad (21)$$

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

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

$$\begin{aligned}
 TCM_d'' = & AS.z_r + H\left(\frac{1}{\gamma P}q^r + qT_d + \sum_{i=1}^{z_r}(IM_{i-1} + \frac{1}{\gamma}M_i)\frac{M_i}{P}\right) + BM \\
 & (\varphi + \frac{q}{P} + T_d + \frac{M_1}{P} - \frac{V_r}{D_r})D_r - (n_r V_r - \frac{q}{\sum_{r=1}^R V_r} - \sum_{i=1}^{z_r-1} O_{ri}) \\
 & \sum_{r=1}^R (\varphi + \frac{q}{P} + T_d + \frac{M_1}{P} - \frac{V_r}{D_r}) \cdot \frac{\sum_{r=1}^R (n_r V_r - \frac{q}{\sum_{r=1}^R V_r} - \sum_{i=1}^{z_r-1} O_{ri})}{\gamma} \\
 & + LM \sum_{r=1}^R (n_r V_r - \frac{q}{\sum_{r=1}^R V_r} - \sum_{i=1}^{z_r-1} O_{ri})
 \end{aligned} \quad (23)$$

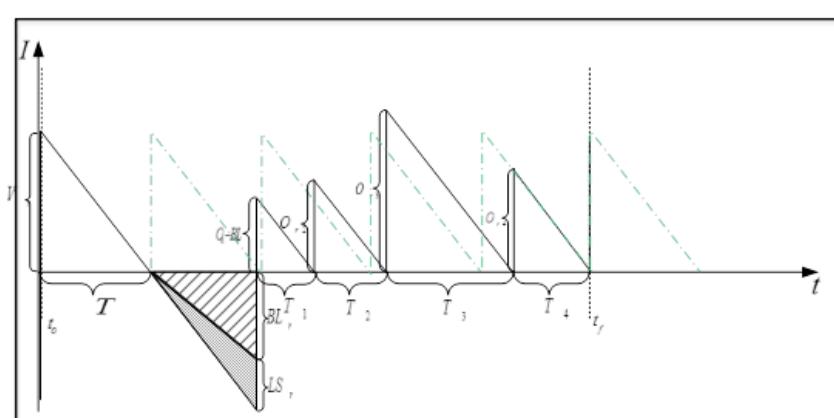
که در آن

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

همانند سطوح دیگر زنجیره تامین در این قسمت هزینه‌های مربوط به هر یک از خرده فروشان در دوره بازیابی اختلال که شامل هزینه سفارش دهی، نگهداشت موجودی، پس افت تقاضا و فروش از دست رفته می‌باشد محاسبه می‌گردد.

هزینه سفارش دهی از فرمول زیر محاسبه می‌گردد:

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



شکل ۴. نمودار وضعیت گردش موجودی خرده فروشان

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

$$\begin{aligned}
 HC_r &= \frac{1}{\gamma} H_r \left(V_r \frac{D_r}{D_r} + (O_{r1} - BL_r) T_{r1} + O_{r2} T_{r2} + O_{r3} T_{r3} + \dots \right) \\
 &= \frac{1}{\gamma} H_r \left(\frac{V_r}{D_r} + (O_{r1} - BL_r) \frac{(O_{r1} - BL_r)}{D_r} + O_{r2} \frac{O_{r2}}{D_r} + O_{r3} \frac{O_{r3}}{D_r} + \dots \right) \\
 &= \frac{H_r}{\gamma D_r} (V_r + (O_{r1} - BL_r)^r + O_{r2}^r + O_{r3}^r + \dots)
 \end{aligned}$$

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

هزینه‌های کمبود شامل فروش از دست رفته و پس افت تقاضا نیز همچون مواردی که در قسمت هزینه‌های تولید کننده درج گردید، محاسبه می‌شود:

$$BLC_r = B_r \cdot (\varphi + \frac{q}{P} + T_d + \frac{M_s}{P} - \frac{V_r}{D_r}) \cdot \frac{BL_r}{2} \quad (26)$$

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

با استفاده از روابط (25)-(28)، تابع هزینه هر خرده فروش در دوره بازیابی اختلال تامین کننده به شرح زیر می‌باشد:

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

و هزینه کل خرده فروشان 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.

$$MS_i \leq Q_s - q_s \quad \text{برای تامین کننده دچار اختلال شده} \quad (31)$$

$$MS_i \leq Q_i \quad i = 1, 2, \dots, z_r \quad (32)$$

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

$$\sum_{i=1}^{z_r} M_i \leq P(n_s T_s - T_d - \varphi) - q \quad (34)$$

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

$$\sum_{i=1}^{z_r} M_i \geq n_s T_s \cdot \sum_{r=1}^R D_r - \sum_{r=1}^R LS_r - q \quad (36)$$

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

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

$$I_* = I_{z_r} = 0 \quad (39)$$

$$IM_* = IM_{z_r} = 0 \quad (40)$$

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

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

$$n_1, n_2, z_1, z_2 \in \mathbb{Z} \quad (43)$$

رابطه (۳۲) و (۳۳) تضمین می‌کنند که میزان تامین توسط تامین کننده دچار اختلال شده در هر دوره از میزان تامین در دوره‌های عادی کمتر می‌باشد. رابطه (۳۴) محدودیت ظرفیت تامین کننده دچار اختلال شده را اعمال می‌کند و رابطه (۳۵) محدودیت تولید کننده را در نظر می‌گیرد. در رابطه (۳۶) از این که کل مقدار تقاضای تولید کننده در دوره بازیابی مدنظر قرار گرفته است، اطمینان حاصل می‌گردد و رابطه (۳۷) همین امر را در خصوص تقاضای خردۀ فروشان بررسی می‌کند. رابطه (۳۸) نشان می‌دهد که تولید کننده سفارشات خود را به موقع تحويل می‌گیرد و دچار کمبود نمی‌شود. رابطه (۳۹) دریافت به موقع سفارشات خردۀ فروشان را بیان می‌کند. رابطه‌های (۴۰) و (۴۱) تضمین می‌کنند که در ابتدا و انتهای دوره بازیابی میزان موجودی در تامین کننده و تولید کننده 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 هشام الدین و دیگران، [۲۰۱۴] مدل بازیابی زنجیره تامین دو سطحی یک مدل پیچیده می‌باشد که نیاز به روش‌های حل خاص برای آن می‌باشد پس می‌توان نتیجه گرفت مدل سه سطحی ارایه شده در این مقاله نیز یک مدل پیچیده برنامه‌ریزی عدد صحیح مختلط می‌باشد که نیاز به روش حل ابتکاری یا فرالبتکاری برای حل آن می‌باشد. که در اینجا یک روش حل ابتکاری ارایه می‌گردد. قبل از ارایه 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 زنجیره تامین صفر می‌باشد. ($I_i = 0, IM_i = 0 \quad \forall i$)

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:

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

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

در واقع این قضیه، نتیجه قضیه ۱ می‌باشد. \square

در روش حل ارایه شده از دو قضیه فوق استفاده خواهد شد. گام‌های این روش به صورت فلوچارت در شکل ۵ ترسیم شده است. ابتدا این مراحل را با پارامترهای مربوط به تامین کنندگان و تولید کننده اجرا نموده و مقادیر بهینه را می‌یابیم. سپس همین مراحل را مجددًا با پارامترهای مربوط به تولید کننده و خرده فروشان تکرار می‌کنیم و مقادیر متغیرها را به دست می‌آوریم.

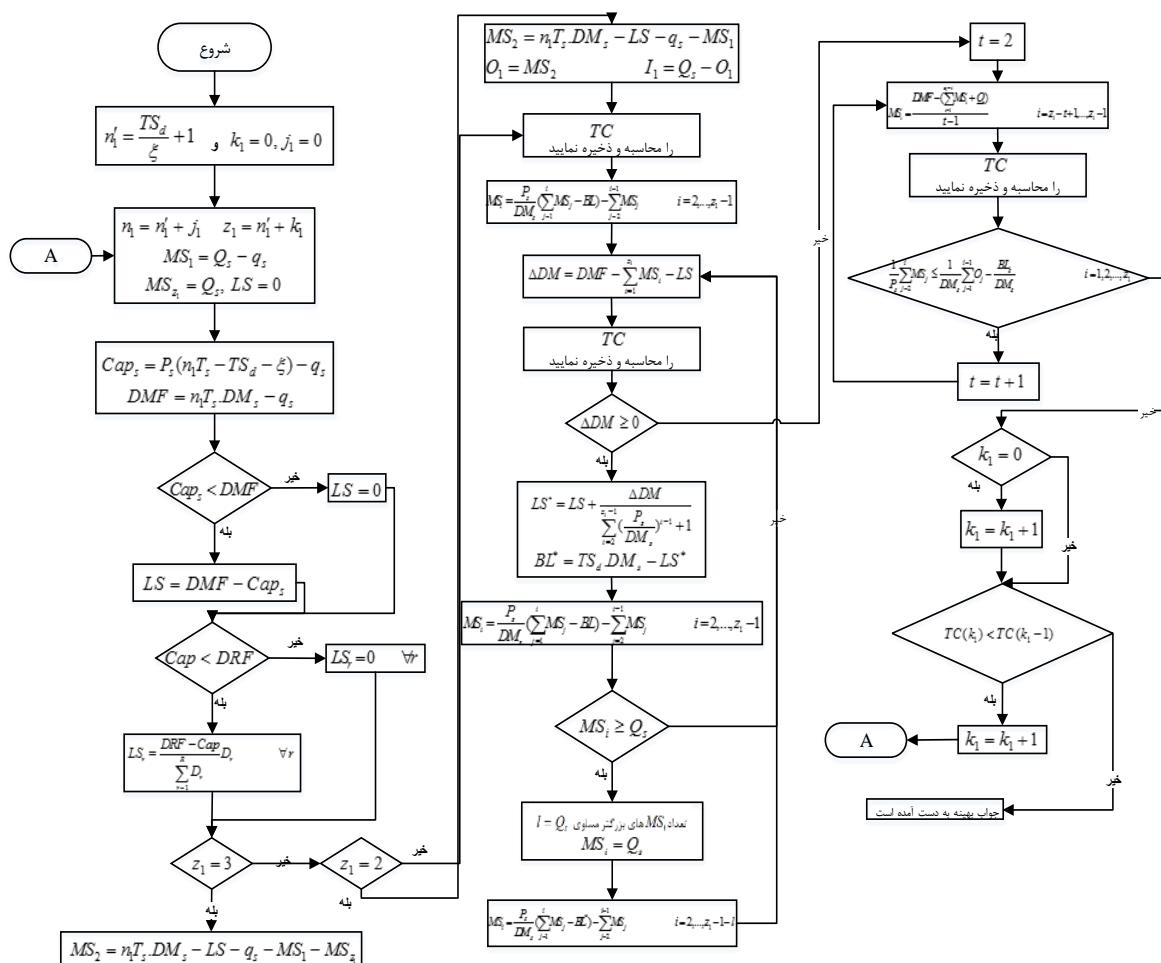
۵ مثال عددی

در این بخش جهت بررسی کاربردی بودن الگوریتم پیشنهادی برای حل مدل طراحی شده، یک زنجیره تامین با سه تامین کننده، یک تولید کننده 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			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
[۲.۱۰]	[۱۸]	[۲.۷]	H_r	[۴.۱۰]	H	[۱۸]	[۵.۱۲]	[۳.۱۵]	H_s
[۸.۶۰]	[۱۵.۸۰]	[۱۰.۷۰]	B_r	[۷۸۰]	BM	[۱۰.۱۰۰]	[۸.۷۰]	[۵.۸۰]	B_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
						[ξ, T_s]			TS_d
						[\circ, Q_s]			q_s

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

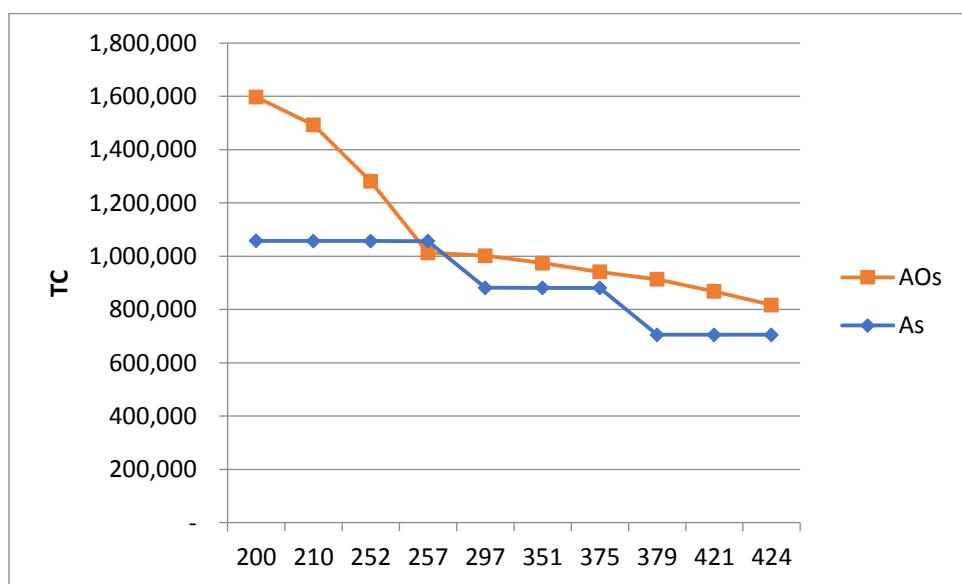
جدول ۴. مقادیر پارامترها و جواب ۱۰ مساله تصادفی

درصد انحراف	TC_GAMS	TC	z_r	z_1	n_r	n_1	q_s	TS_d	LM_s	L_s	BM_s	B_s	HM_s	H_s	AO_s	A_s	شماره
%/0.....۲	۱۵۲۱۸۴۷/۲۲	۱۵۲۱۸۴۹/۴۵	۵	۸	۴	۳	۳۷۸	۰/۰۰۲۸	۴۸	۴۹	۷۵	۷۹	۹	۴	۲۸۰	۴۱۵	۱
%/0.....۶	۱۵۳۱۵۳۲/۸۲	۱۵۳۱۵۳۳/۷۲	۱۲	۹	۶	۴	۳۰۹	۰/۰۰۸۹	۸۴	۲۱	۶۲	۶۰	۱۵	۴	۲۵۵	۲۴۳	۲
%/0.....۵	۱۵۱۲۸۹۵/۲۸	۱۵۱۲۸۹۴/۵۲	۱۲	۴	۶	۳	۶۹	۰/۰۰۵	۴۶	۸۱	۶۵	۵۰	۱۵	۱۱	۲۵۲	۲۰۸	۳
%/0.....۰	۲۴۲۴۶۱۶/۴۲	۲۴۲۴۶۱۶/۴	۸	۶	۶	۳	۳۵۷	۰/۰۰۳۹	۳۵	۵۵	۴۷	۲۰	۱۰	۳	۴۰۴	۱۱۰	۴
%/0.....۲	۱۶۷۳۶۴۹/۴۴	۱۶۷۳۶۴۹/۸۵	۱۵	۶	۸	۵	۲۹۹	۰/۰۰۹۲	۹۷	۵۹	۲۱	۴۹	۹	۷	۲۰۹	۲۰۳	۵
%/0.....۴	۲۱۳۱۷۰۶/۰۴	۲۱۳۱۷۰۵/۲۸	۱۲	۵	۵	۴	۱۷۷	۰/۰۰۸۹	۷۸	۶۹	۷۳	۲۵	۱۴	۸	۴۲۶	۳۳۳	۶
%/0.....۰	۹۳۲۹۸۱/۱۷	۹۳۲۹۸۱/۲۵	۷	۵	۳	۲	۱۵۱	۰/۰۰۲۲	۱۰۰	۷۵	۲۰	۱۳	۱۱	۱۰	۲۱۱	۲۸۸	۷
%/0.....۴	۱۱۵۵۷۹۴	۱۱۵۵۷۹۴/۵	۱۰	۷	۵	۳	۳۴۹	۰/۰۰۵	۶۶	۵۵	۶	۲۹	۷	۵	۲۲۱	۲۴۹	۸
%/0.....۶	۵۹۶۶۰۱/۷۸	۵۹۶۶۰۰/۸۲	۶	۴	۴	۲	۲۴۰	۰/۰۰۱۹	۶۷	۴۷	۶۰	۲۳	۱۵	۶	۱۴۹	۱۷۹	۹
%/0.....۲	۲۸۰۷۹۲۳/۱۱	۲۸۰۷۹۲۳/۶۸	۸	۵	۷	۴	۱۵۸	۰/۰۰۸	۵۳	۹۶	۷۲	۱۱	۱۲	۵	۴۰۱	۱۳۹	۱۰

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

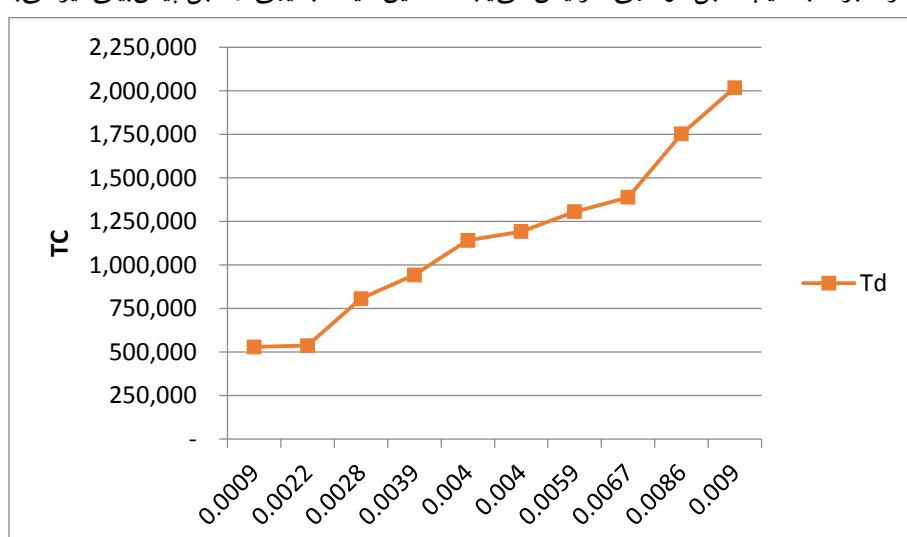
جهت تحلیل حساسیت نیز از نمونه‌های مناسب از مسایل تصادفی تولید شده که در بالا توصیف گردید استفاده شده است به طوری که کلیه پارامترها روی مقدار وسط بازه تعیین شده ثابت فرض گردیده و تغییرات متغیر مورد بررسی ترسیم شد که نتایج قابل تامیل را در پی داشت.

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 شبیه 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 اختلال شده، هزینه بازیابی کل کاهش می‌یابد. علت این رفتار می‌تواند کاهش تعداد دوره‌های زمانی بازیابی در اثر افزایش هزینه‌های ثابت باشد.



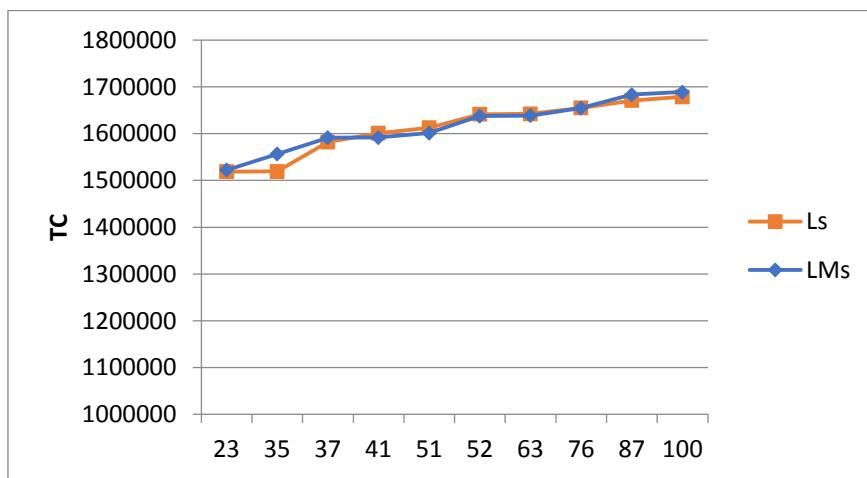
شکل ۶. تغییرات هزینه بازیابی کل براساس تغییرات هزینه راهاندازی تامین‌کننده مختل شده و هزینه ثابت سفارش‌دهی تولیدکننده به آن

وضعیت تغییرات هزینه کل بازیابی زنجیره تامین 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 به عبارت دیگر جبران با شبیه 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 تامینکننده مربوطه میباشد. همانطور که در شکل ۸ ملاحظه میشود با افزایش هزینه‌های فروش از دست رفته، هزینه کل نیز افزایش مییابد؛ اما شیب این نمودار ملایم است علت این امر میتواند رجحان پس افت تقاضا بر فروش از دست رفته باشد که با توجه به مفروضات مساله مبنی بر وجود ظرفیت خالی و کمتربودن 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 نتیجه‌گیری و پیشنهاد تحقیقات آتی

در مقاله حاضر، یک مدل برنامه‌ریزی بازیابی زنجیره‌تامین سه سطحی پس از وقوع اختلال تامین ارایه گردید که با توجه به غیرقابل پیش‌بینی بودن برخی حوادث در شرکت‌های تولیدی، می‌تواند کاربردهای فراوانی در صنعت داشته باشد. هدف اصلی این پژوهش کمک به تصمیم‌گیری و بازنگری برنامه‌های تامین، تولید و سفارش دهی در زنجیره‌تامین به محض وقوع اختلال می‌باشد به گونه‌ای که هزینه‌های کل زنجیره‌تامین برای بازگشت سیستم به حالت قبل از وقوع اختلال کمینه گردد. مدل طراحی شده یک مدل ریاضی برنامه‌ریزی عدد صحیح مختلط می‌باشد که با الگوریتم ابتکاری پیشنهادی حل شده است و جهت ارزیابی صحت نتایج و کاربردی بودن روش پیشنهادی، برای مسایل کوچک، مدل همزمان با نرم‌افزار GAMS نیز اجرا گردید و نتایج برای ۲۰۰ مساله تصادفی که با داده‌های تصادفی تولید گردیده است مورد مقایسه قرار گرفت و درصد انحراف جواب نهایی در این دو روش نشان می‌دهد الگوریتم پیشنهادی قابل پذیرش می‌باشد.

با توجه به نتایج حاصل از مطالعه انجام شده به مدیران شرکت‌های صنعتی توصیه می‌گردد در صورت وقوع اختلال در زنجیره‌تامین خود، در کنار اجرای اقدامات اصلاحی در راستای رفع مشکل به وجود آمده، به صورت موازی تیم برنامه‌ریزی بازیابی نیز تشکیل داده و به صورت یکپارچه و در کل زنجیره‌تامین به بازنگری و اخذ

تصمیمات اجرایی در خصوص میزان و نحوه تولید و ارسال کالاها در طول زنجیره تامین پردازند 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 اعضاء در این شرایط تعیین گردد تا در صورت وقوع حادثه‌ای بتوان با احتساب این موارد، در برنامه‌های زنجیره تامین 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 زنجیره تامین اعم از تولید کننده 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 زنجیره تامین و یا وقوع اختلال در دوره زمانی بازیابی یک اختلال باشد که مورد توجه نویسنده‌گان 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] Apté, 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. (2000). 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 .