فصلنامه مدیریت راهبردی در سیستم های صنعتی (مدیریت صنعتی سابق)
دانشگاه آزاد اسلامی واحد سنندج
سال نوزدهم/ شماره ۶۷ / بهار ۱۴۰۳

طراحی مدل زنجیره تأمین چند محصولی باوجود اختلال در تأمین‌کننده با رویکرد بهینه‌سازی ریاضی استوار در صنایع تعمیراتی پالایشگاهی

امیر رحیمی‌منش
دانشجوی دکتری مدیریت صنعتی، دانشکده مدیریت و حسابداری، واحد رشت، دانشگاه آزاد اسلامی، رشت، ایران
حمزه امین طهماسبی (نویسنده مسؤول)
دانشیار، گروه مهندسی صنایع، دانشکده فنی و مهندسی شرق، دانشگاه گیلان، رودسر، ایران
Email: amintahmasbi@guilan.ac.ir
کامبیز شاهرودی
دانشیار، دانشکده مدیریت و حسابداری، واحد رشت، دانشگاه آزاد اسلامی، رشت، ایران

تاریخ دریافت: ۱۴۰۲/۰۹/۱۱ ❋ تاریخ پذیرش ۱۴۰۳/۰۳/۱۹

چکیده
مسئله طراحی شبکه زنجیره تأمین شامل تصمیمات استراتژیکی است که بر پیکربندی و تصمیمات تاکتیکی و عملیاتی تأثیر بسزایی دارد. هدف از این پژوهش ارائه مدل زنجیره تأمین چند محصولی باوجود اختلال در تأمین‌کننده با رویکرد بهینه‌سازی ریاضی استوار است. در راستای مدیریت زنجیره تأمین چند محصولی، نیاز به تأمین اقلام و مواد اولیه جهت استفاده در فرآیندها وجود دارد و تأمین این اقلام با عدم قطعیت مواجه است به‌گونه‌ای که ممکن است تأمین‌کنندگان، بخشی از تقاضای سفارش داده‌شده را در زمان موردنیاز در اختیار سفارش‌دهنده قرار ندهند. به‌منظور مقابله با این شکل از عدم قطعیت، دو نوع تأمین‌کننده موردنظر است. دسته اول تأمین‌کننده‌های ارزان‌قیمت ولی غیرمطمئن است و در مقابل، دسته دوم تأمین‌کننده‌ها وجود دارند که مطمئن هستند ولی گران‌تر از دسته اول می‌باشند. اقلام دریافتی از تأمین‌کننده‌ها، در فرآیند تولید یا تعمیرات مورداستفاده قرار می‌گیرد و مدلی مدون برای مدیریت این فرآیند می‌بایست ارائه گردد. جهت ادغام این تصمیمات در قالب مدل یکپارچه، در مقالات پیشین، مدل تصمیم‌گیری دومرحله‌ای تصادفی بکار رفته است و در حل مسئله پیشنهادی از روش تقریب میانگین نمونه‌گیری استفاده‌شده است. در این پژوهش با توجه به وابستگی مدل دومرحله‌ای تصادفی به پارامترهای غیرقطعی (یا بدترین سناریو) و همین‌طور ضرورت شدنی بودن مدل برای بدترین سناریو، مدل ریاضی استوار توسعه‌یافته برای مدل دومرحله‌ای تصادفی ارائه گردیده است. درنهایت مدل استوار به تصمیم‌گیرنده فرصت می‌دهد تا پارامترها را با توجه به درجه اهمیت هرکدام از اجزا انتخاب کند.

کلمات کلیدی: زنجیره تأمین، بهینه‌سازی ریاضی استوار، اختلال، مدل دومرحله‌ای تصادفی.

۱- مقدمه

حادثه‌های طبیعی و انسانی هر دو می‌توانند تأثیرات گسترده‌ای بر جوامع بگذارند و باعث ایجاد نیاز به کمک شوند. برای مثال، تحریم می‌تواند سیستم‌های اجتماعی و اقتصادی را به‌شدت تحت تأثیر قرار دهد و واکنش‌هایی از سوی سازمان‌های مختلف را به دنبال داشته باشد (Zhen et al., 2015; WHO, 2002). این حوادث نیازمند برنامه‌ریزی دقیق و آمادگی‌های لازم برای مدیریت بحران هستند تا بتوانند خسارات جانی و مالی را به حداقل برسانند. همچنین این کار باعث می‌شود که بازگشت به حالت عادی در سریع‌ترین حالت ممکن ایجاد شود. آگاهی از نوع این حوادث و همچنین داشتن استراتژی‌های مناسب برای مقابله با آن‌ها، برای هر جامعه‌ای ضروری است. هنگامی‌که یک حادثه همانند تحریم و به دنبال آن اختلالاتی در سیستم رخ می‌دهد، معمولاً تقاضا و نیز کمبود به‌طور قابل‌توجهی افزایش می‌یابد (Jabbarzadeh et al., 2012). در محیط‌های رقابتی کنونی، مدیریت زنجیره تأمین به یک مسئله کلیدی برای سازمان‌های تجاری تبدیل‌شده است. این امربر فعالیت‌های مختلف سازمان تأثیر می‌گذارد، از خرید و تولید مواد اولیه تا کاهش هزینه‌ها و خدمات پس از فروش، شبکه‌های زنجیره تأمین شامل معکوس، خطی، پایدار و ... هستند؛ که به‌عنوان‌مثال زنجیره تأمین معکوس به فرآیند مدیریت جریان کالاها و اطلاعات از مشتری به سمت تأمین‌کننده یا تولیدکننده گفته می‌شود (Amin-Tahmasbi et al., 2018; Dakhely Parast, 2021). یکی از مهم‌ترین عوامل تأثیرگذار بر کارایی و بهره‌وری کل زنجیره تأمین، انتخاب تأمین‌کننده است. تأمین‌کنندگان نقش حیاتی در تأمین مواد اولیه، قطعات و ... برای تولید محصولات نهایی دارند. از اهمیت انتخاب تأمین‌کننده در زنجیره تأمین، می‌توان به بهبود عملکرد زنجیره تأمین، کیفیت محصولات و خدمات، کاهش ریسک‌ها، انعطاف‌پذیری و پاسخگویی و ...اشاره کرد (Weber et al., 1991; Dickson et al, 1966; Tang et al., 2006). پیچیدگی مسئله انتخاب تأمین‌کننده در حقیقت به این دلیل است که هرکدام از تأمین‌کنندگان بخشی از نیازهای خریدار را برآورده می‌کنند. به همین دلیل انتخاب تأمین‌کننده ملزم به یک رویکرد ساختاریافته و سیستمی است. ازآنجاکه عملکرد تأمین‌کنندگان، اثر اساسی بر موفقیت یا شکست زنجیره تأمین دارد، انتخاب تأمین‌کننده یک وظیفه راهبردی شناخته می‌شود (Beheshtinia & Nemati, 2017).

در زنجیره تأمین چند محصولی، محصولات گوناگون از منابع متعدد تهیه می‌شوند. این محصولات درنهایت به مشتریان تحویل داده می‌شوند. مدیریت زنجیره تأمین چند محصولی، نسبت به زنجیره تأمین تک‌محصولی پیچیدگی بیشتری دارد زیرا باید بین تأمین‌کنندگان، تولیدکنندگان و توزیع‌کنندگان برای محصولات مختلف هماهنگی ایجاد شود. در زنجیره تأمین چند محصولی، اختلال در تأمین‌کننده می‌تواند تأثیرات زیادی بر عملکرد کل زنجیره تأمین داشته باشد. یک رویکرد مناسب برای مدیریت این اختلالات بهینه‌سازی استوار در زنجیره تأمین هست. بهینه‌سازی استوار یکی از روش‌هایی است که می‌تواند تحت شرایط عدم قطعیت عملکرد قابل قبولی داشته باشد. این روش می‌تواند در زنجیره تأمین به کار گرفته شود تا تأثیر ریسک‌های ناشی از اختلالات در تأمین‌کنندگان کاهش داده شود (Pishvaee & torabi, 2010; Snyder & Daskin, 2006; Zokaee et al., 2016; Bertsimas et al., 2004). رحیمی منش و همکاران (Rahimimanesh et al., 2020) باهدف بررسی اثر اختلال در زنجیره تامین شامل تامین‌کننده اقلام اولیه، تولیدکننده محصولات و مشتری نهایی، با رویکرد رویکردهای منبع‌یابی اقتضائی جهت مقابله با اختلال به ارائه مدل دومرحله‌ای تصادفی پرداختند و با استفاده از روش تقریب میانگین نمونه‌گیری به حل آن پرداختند. در این پژوهش با توجه به پارامترهای غیرقطعی موجود در مدل توسعه‌یافته توسط ایشان، یک مدل ریاضی استوار برای حل مساله توسعه داده می‌شود تا بهتر بتوانند با عدم قطعیت‌های تأمین‌کنندگان مقابله کنند. جنبه‌های نوآوری این پژوهش عبارت است از ۱- توسعه و به‌کارگیری مفاهیم استواری جهت مقابله با اثرات مخرب اختلال و ایجاد جواب‌های قابل‌قبول ۲- طراحی مدل زنجیره تأمین چند دوره‌ای چند محصولی تک هدفه با تقاضای ثابت و نقطه سفارش مجدد بخش‌های این پژوهش به ترتیب روش شناسی پژوهش، مدل پژوهش و نتایج و بحث هست.

۲-روش‌شناسی پژوهش

الف) مرور ادبیات و پیشینه نظری

گابالا اولین پژوهشگری است که برنامه‌ریزی ریاضی را برای انتخاب تأمین‌کننده در یک مورد واقعی به کاربرد. در پژوهش ورویج روش تخمین میانگین نمونه‌ای در حل مسائل مسیریابی تصادفی بررسی‌شده است (Gaballa, 1974). روش تخمین میانگین

نمونه‌ای یک تکنیک برای حل مسائل بهینه‌سازی تصادفی است که از شبیه‌سازی مونت‌کارلو بهره می‌گیرد. نتایج محاسباتی نشان می‌دهند که روش پیشنهادی موفق بوده و توانسته است مسائلی با تعداد سناریوهای بالا حل کند. زنجیره تأمین موردبررسی در این مقاله به‌صورت معکوس است و بر روند مسیریابی بین تأمین‌کنندگان و مشتریان تمرکز دارد (Verweij et al., 2003).

در پژوهش اشمیت و سینگ، هدف اندازه‌گیری و مدیریت ریسک‌های اختلال در زنجیره تأمین هست. این مقاله از دو روش شبیه‌سازی مونت‌کارلو و شبیه‌سازی رویدادهای گسسته برای بررسی و تحلیل ریسک‌ها استفاده می‌کند. این مقاله به تحلیل این می‌پردازد که چگونه عدم قطعیت‌ها می‌توانند منجر به اختلالات مختلف شوند و تأثیرات این اختلالات را بر روی عملکرد زنجیره تأمین بررسی می‌شود (Schmitt & Singh, 2009). تاملین و همکاران در پژوهشی به بررسی اثر یادگیری تأمین‌کننده بر استراتژی‌های زنجیره تأمین و مدل‌های موجودی در شرایط عدم قطعیت می‌پردازد. مقاله نشان می‌دهد که وقتی عدم قطعیت افزایش می‌یابد، این موضوع به جذابیت تأمین‌کننده می‌افزاید. عدم قطعیت در توزیع بازدهی تأمین‌کنندگان و عدم قطعیت در پیش‌بینی‌های قابلیت اطمینان تأمین‌کنندگان از عدم قطعیت‌های موجود می‌باشد (Tomlin et al., 2009).

در پژوهش ساویک به بررسی چگونگی انتخاب پرتفولیوی تأمین‌کنندگان تحت ریسک‌های اختلال پرداخته می‌شود. برای انتخاب بهینه پرتفولیوی تأمین‌کنندگان در شرایط ریسک اختلال، مدل‌های برنامه‌ریزی عدد صحیح مختلط ارائه‌شده‌اند. مقاله به زنجیره تأمین چندمحصولی و چند سطحی می‌پردازد که در آن تأمین‌کنندگان مختلفی برای تأمین نیازهای مختلف مورداستفاده قرار می‌گیرند. این زنجیره تأمین به‌گونه‌ای طراحی‌شده است که بتواند در برابر اختلالات مختلف مقاومت کند. اختلالات در این پژوهش می‌توانند ناشی از عواملی مانند بلایای طبیعی، مشکلات تولید و مسائل مربوط به حمل‌ونقل باشند. همچنین فن‌های مدیریت ریسک مانند ارزش در معرض خطر و ارزش در معرض خطر شرطی استفاده می‌کنند (Sawik, 2011).

در پژوهش سورگوت و کی به بررسی یک مسئله مدیریت موجودی در یک زنجیره تأمین دوسطحی می‌پردازد که تحت تأثیر اختلالات تصادفی قرار دارد. همچنین به تحلیل حساسیت راه‌حل بهینه پرداخته است تا نشان دهد چگونه تغییرات در پارامترها می‌تواند بر تصمیمات مربوط به موجودی تأثیر بگذارد. درنهایت شرایطی را بررسی می‌کند که در آن سیاست سفارش بدون موجودی ترجیح داده می‌شود (Sargut & Qi, 2012). در پژوهش اشمیت و همکاران، مقاله به تحلیل کمی ریسک و همچنین اختلال در زنجیره تأمین چندلایه پرداخته‌شده است. زنجیره تأمینی موردبررسی به‌صورت زنجیره تأمین چندلایه است. زنجیره تأمین شامل چندین سطح از تأمین‌کنندگان، توزیع‌کنندگان و خرده‌فروشان است که تأمین کالا و خدمت را به مشتریان نهایی فراهم می‌کنند. عدم قطعیتی موردبررسی شامل اختلالات زنجیره تأمین و عدم قطعیت تقاضا است (Schmitt et al., 2012).

در پژوهش ترابی و همکاران، به بررسی انتخاب تأمین‌کننده و تخصیص سفارشات تحت ریسک‌های عملیاتی و اختلالات می‌پردازد. هدف اصلی مقاله توسعه مدل‌هایی است که بتوانند ریسک‌های عملیاتی و اختلالات ناگهانی را در نظر بگیرد. این مقاله به بررسی اختلالات پرداخته است. اختلالات می‌توانند شامل بلایای طبیعی، مشکلات تولیدی، نوسانات تقاضا و مسائل مربوط به حمل‌ونقل باشند. زنجیره تأمین مطالعه شده در این پژوهش چندمحصولی و چند سطحی است (Torabi et al., 2015). در پژوهش جبار زاده و همکاران، هدف مقاله طراحی یک مدل بهینه‌سازی ترکیبی از نوع مقاوم–تصادفی است. در این پژوهش همچنین به بررسی چگونگی بهبود تاب‌آوری با توجه به اختلالات ناشی از همچنین نوسانات در عرضه و تقاضا پرداخته می‌شود. از جمله اختلالات وجود اختلالات در تأمین، اختلالات در تقاضا و اختلالات در تأسیسات می‌باشد. روش حل بکار رفته برای حل مسئله لاگرانژ می‌باشد (Jabbarzadeh et al., 2016).

در پژوهش یاهو و ماینر، به بررسی و تحلیل مدل‌های مختلف موجودی پرداخته است. مقاله به بررسی مدل‌هایی می‌پردازد که تأمین‌کنندگان مختلف را در فرآیند مدیریت موجودی شامل می‌شوند. همچنین به تحلیل استراتژی‌های مختلف موجودی که به بهینه‌سازی سطح خدمات و کاهش هزینه‌ها کمک می‌کنند می‌پردازد (Yao & Minner, 2017). در پژوهش مورالز و همکاران به بررسی یک مسئله مربوط به مدیریت موجودی و مسیریابی با توجه به اختلالات شبکه‌ای پرداخته‌شده است. در این

مسئله، تصمیم‌گیری درباره سطح موجودی و مسیریابی وسایل نقلیه به‌طور هم‌زمان انجام می‌شود. زنجیره تأمین موردبررسی در این مقاله زنجیره تأمین پویا است. این رویکرد می‌تواند به بهبود کارایی و کاهش هزینه‌ها در زنجیره تأمین کمک کند (Morales et al., 2019). در مقاله هی و همکاران، به بررسی سیاست‌های بهینه سفارش گذاری برای خرده‌فروشان در مواجهه با اختلالات زنجیره تأمین و همچنین عدم قطعیت‌های مرتبط با تقاضا و قیمت می‌پردازد. همچنین یک رویکرد مدل‌سازی جدید برای بهینه‌سازی برنامه‌ریزی موجودی در یک زنجیره تأمین دومرحله‌ای پیشنهادشده است (He et al., 2019). در مقاله پراکاش و همکاران نتایج آزمایش‌های عددی زیادی را نشان می‌دهد که تأیید می‌کند مدل‌های شبکه زنجیره تأمین مبتنی بر ریسک بهتر از سایر زنجیره تأمین هستند. این مقاله با استفاده از یک مورد کاربردی از یک شرکت ای‌کامرس هندی نشان می‌دهد که ساختار زنجیره تأمین به‌دست‌آمده از طریق این رویکرد در شاخص‌های عملکرد مختلف بهتر عمل می‌کند. مقاله از یک رویکرد بهینه‌سازی قوی استفاده می‌کند. این مقاله بررسی می‌کند که چگونه زنجیره تأمین بسته برای مدیریت بازگشتی و مدیریت عدم قطعیت طراحی می‌شود (Prakash et al., 2020). در مقاله ایوانوف و دولگی، به بررسی شبکه‌های زنجیره تأمین درهم‌تنیده و تاب‌آوری آن‌ها در برابر اختلالات بزرگ، مانند باندمی کووید_۱۹، پرداخته می‌شود. همچنین در این پژوهش بررسی می‌شود که چگونه اختلالات ناشی از این پاندمی توانسته‌اند بر شبکه‌های زنجیره تأمین تأثیر بگذارند. زنجیره تأمینی که در این مقاله موردبررسی قرارگرفته، شبکه زنجیره تأمین درهم‌تنیده است. مقاله به‌طور مستقیم به عدم قطعیت‌ها و چالش‌های ناشی از آن‌ها می‌پردازد (Ivanov & Dongui, 2019). در پژوهش صادقی و همکاران احتمالاً از مدل‌های ریاضی برای شبیه‌سازی و بهینه‌سازی شبکه زنجیره تأمین استفاده‌شده است. این مدل‌ها ممکن است شامل برنامه‌ریزی خطی، برنامه‌ریزی عدد صحیح، یا سایر تکنیک‌های بهینه‌سازی باشند. هدف اصلی مقاله توسعه مدلی است که بتواند نه‌تنها کارایی و پایداری زنجیره تأمین را تضمین کند بلکه آن را در برابر اختلالات مقاوم‌تر سازد (Sadeghi et al., 2021). در پژوهش فلاح و همکاران، به طراحی یک شبکه زنجیره تأمین برای مدیریت بحران با استفاده از یک چارچوب بهینه‌سازی قوی می‌پردازد. هدف اصلی این تحقیق، ایجاد یک زنجیره تأمین انعطاف‌پذیر و مقاوم در برابر حوادث بوده است که قادر به مدیریت بهینه اختلالات و بحران‌های مختلف می‌باشد (Fallah et al., 2023). در پژوهش صفری و همکاران این مقاله به اهمیت پایداری در طراحی زنجیره تأمین اشاره می‌کند و تأکید می‌کند که عوامل اجتماعی و زیست‌محیطی در کنار اهداف اقتصادی در عملکرد زنجیره تأمین اهمیت دارند. همچنین یک مدل بهینه‌سازی چندهدفه در شرایط خطر اختلال در زنجیره تأمین معرفی می‌شود. این مدل شامل موارد زیر می‌باشد: تعیین مکان‌ها و برنامه‌ریزی ظرفیت انتخاب‌کننده، مدیریت موجودی، تخصیص سفارشات، برنامه‌ریزی حمل‌ونقل، اندازه‌گیری دسته‌ها، برنامه‌ریزی تولید. همچنین مدل از رویکرد برنامه‌ریزی تصادفی چندهدفه مبتنی بر سناریو برای مقابله با عدم قطعیت بهره می‌برد (Safari et al., 2023). در پژوهش کیم و همکاران به بررسی طراحی شبکه زنجیره تأمین حلقه بسته می‌پردازد. در این مقاله، یک مدل برنامه‌ریزی خطی مختلط باهدف‌های چندگانه برای مسئله در دوره‌های چندگانه و برای محصولات مختلف طراحی‌شده است. مدل این مقاله دارای سه هدف اصلی است: کاهش هزینه‌های کل، کاهش میزان انتشار CO_2 ، افزایش فرصت‌های شغلی. برای مقابله با عدم قطعیت از رویکرد بهینه‌سازی فازی استوار استفاده‌شده است (Kim et al., 2024). تحلیل پژوهش‌های انجام‌شده بر اساس داده‌های جدول ۱ مبنای ارائه‌ی شکاف تحقیقاتی و ارائه‌ی مدل پیشنهادی در نظر گرفته‌شده است. در این پژوهش یک مدل تک هدفه چند دوره‌ای چند محصولی طراحی‌شده است. تقاضا در این پژوهش ثابت در نظر گرفته‌شده است. عدم قطعیت روی عرضه و تقاضا در نظر گرفته‌شده و از رویکرد بهینه‌سازی استوار برای مقابله با عدم قطعیت استفاده‌شده است. زنجیره تأمین به شکل چندمرحله‌ای است. اختلال تأمین‌کننده به‌صورت تصادفی در نظر گرفته‌شده است. همچنین زمان تدارکات متغیر است. راهبرد مقابله کلان به‌صورت منبع یابی است که منبع یابی در نظر گرفته‌شده در این پژوهش از نوع منبع یابی مشروط است. همچنین سفارش به‌صورت نقطه سفارش مجدد در این زنجیره تأمین بررسی‌شده است. موارد بکار رفته در این پژوهش از بررسی شکاف تحقیقاتی مقالات مختلف در پیشینه پژوهش به‌دست‌آمده است. این موارد در مقالات اندک دیده‌شده یا به‌طور هم‌زمان در نظر گرفته نشده است. همین موضوع موجب برتری این پژوهش نسبت به مقالات بررسی‌شده می‌باشد.

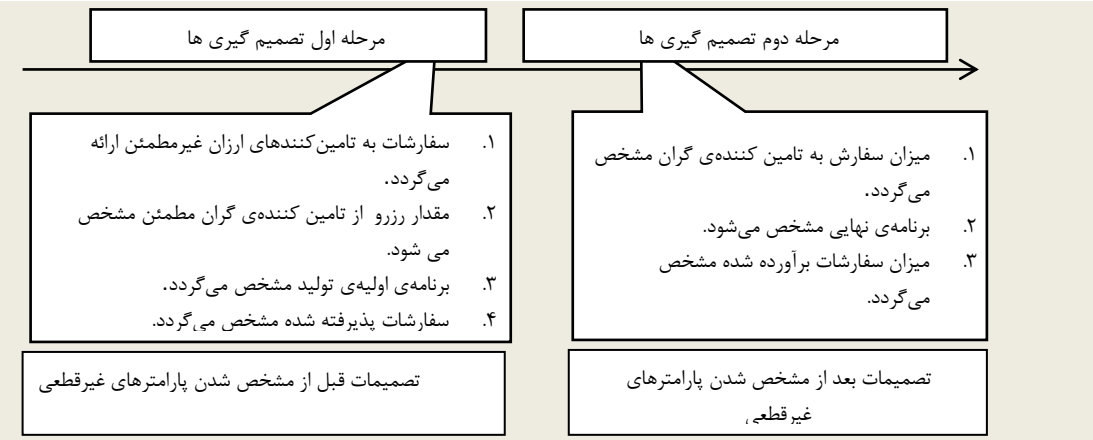
جدول شماره (۱): خلاصه‌ی مرور ادبیات مدل‌های موجودی با اختلال

ردیف	محقق	سال	زمان‌بندی		تعداد اقلام		تقاضا		راهبرد مقابله کلان			سفارش				اختلال		زمان تدارکات		مراحل زنجیره		عدم قطعیت			مدل ریاضی	
			دوره‌ای							منبع یابی												پارامتر		روش		
			تک دوره‌ای	چند دوره‌ای	پیوسته	تک	چند	ثابت	متغیر	نگهداری موجودی	تک منبع	چند منبع	منبع مشروط	اندازه خاص تا	میزان سفارش	مجدد نقطه سفارش	ثابت	تصادفی	ثابت	متغیر	تک مرحله	چند مرحله	عرضه	نقاضا	استوار	تک هدفه	چند هدفه
۱	Gaballa	1974			*	*		*		*						*					*					*	
۲	Verweij et al	2003			*	*		*		*					*	*	*					*				*	
۳	Tomlin	2009			*	*		*		*					*	*	*		*			*		*	*		
۴	Schmitt & smigh	2009			*	*		*						*				*			*						
۵	Sawik	2011			*	*			*				*		*								*			*	
۶	Schmitt & Smigh	2012		*		*			*	*				*			*					*	*	*			
۷	Sargut & Qi	2012			*			*		*		*		*	*	*						*	*	*			
۸	Torabi et al	2015		*			*		*	*		*				*		*	*			*				*	
۹	Jabbarzadeh et al	2016			*	*			*	*						*		*				*				*	
۱۰	Yao & minner	2017		*		*		*		*			*	*				*			*			*			*
۱۱	Morales et al	2018		*			*		*	*					*				*			*					*
۱۲	He et al	2019		*			*	*		*		*		*	*							*				*	
۱۳	Prakash et al	2020		*		*		*					*	*				*				*			*	*	
۱۴	Rahimi Menesh et al	2020		*			*		*	*					*			*	*	*		*					
۱۵	Ivanov & Dolgui	2020	*				*		*	*			*			*		*		*		*		*			
۱۶	Sadeghi et al	2021			*		*		*	*			*		*			*	*			*		*	*	*	
۱۷	Fallah et al	2023		*			*		*	*			*			*		*	*			*		*	*	*	
۱۸	Safari et al	2023		*			*		*	*			*			*		*	*			*		*	*	*	*
۱۹	Kim et al	2024		*			*		*	*			*			*		*	*			*		*	*		*
	پژوهش حاضر			*			*	*		*			*			*		*	*			*		*	*		

ب) مدل پژوهش

مسئله‌ی موردپژوهش همان مسئله ارائه‌شده توسط رحیمی منش و همکاران (Rahimimanesh et al., 2020) است که در اینجا به حالت استوار ارائه خواهد شد. مسئله در محیط چند آیتمی، چندمحصولی در محیط تولیدی موردبررسی قرار می‌گیرد. در

این پژوهش، هدف اصلی، بررسی اثر اختلال در زنجیره تأمین برای یک زنجیره تأمین شامل تأمین‌کننده اقلام اولیه، تولیدکننده محصولات و مشتری نهایی است. در زنجیره تأمین با توجه به شرایط بازار و عوامل غیرقطعی موجود در بازارهای رقابتی، این امکان وجود دارد تا تأمین مواد اولیه با اختلال مواجه گردد. در این پژوهش عملاً اختلال به‌طور مستقیم بر روی تأمین مواد اولیه مدنظر قرارگرفته است. در این سیاست، سفارش‌ها در ساختار دومرحله‌ای داده می‌شود به‌گونه‌ای که در مرحله‌ی اول سفارش‌ها به تأمین‌کننده‌های ارزان‌تر ارائه می‌شود و در مرحله‌ی دوم به‌محض اینکه مشخص شد که تأمین‌کنندگان ارزان چه مقدار کالا را برآورده کرده است، سفارش‌ها به تأمین‌کننده‌ی گران‌تر ارائه می‌گردد. تأمین‌کننده‌ی ارزان دارای عدم قطعیت از نوع بازده تصادفی[1] و همین‌طور عدم قطعیت در زمان تدارک می‌باشند. در ارتباط با عدم قطعیت از نوع بازده تصادفی، تنها بخشی از سفارش داده‌شده توسط این تأمین‌کننده تحویل داده می‌شود. جهت استفاده از تأمین‌کننده‌ی گران (مطمئن) در مرحله‌ی دوم می‌بایست آیتم‌ها را از این تأمین‌کننده رزرو نمود. درصورتی‌که در چنین وضعیتی سفارشی به تأمین‌کننده‌ی گران ارائه نگردد یا اینکه تأمین‌کننده از حالت در دسترس خارج گردد، هزینه‌ی رزرو موجودی عملاً ازدست‌رفته محسوب می‌شود. هدف مدل از بعد سفارش دهی، تعیین مقادیر سفارش به هرکدام از تأمین‌کنندگان است. همچنین این مدل، انجام تأمین باقیمت پایین‌تر از تأمین‌کننده‌ی ارزان و نیز استفاده از درجه اطمینان بالاترِ تأمین‌کننده‌ی گران را به همراه خواهد داشت. عدم تأمین هرکدام از اقلام اولیه، موجب عدم توانایی در تولید محصول نهایی مربوطه می‌شود. چنین فرضی موجب می‌شود که فرآیند سفارش دهی مواد اولیه و تولید محصولات نهایی وابستگی بیشتری داشته باشند. لذا این مدل سعی دارد تا رابطه‌ی میان سفارش دهی برای مواد اولیه و برنامه‌ریزی تولید را نیز برقرار نماید. واضح است که هرکدام از محصولات نهایی نیازمند اقلام و مواد اولیه است. با توجه به اینکه در فرآیند تولید تمامی مواد اولیه می‌بایست تأمین گردند و عملاً رابطه‌ی مستقیمی می‌بایست بین برنامه‌ی تولید هرکدام از محصولات نهایی و تأمین مواد اولیه برقرار شود، در مدل پیشنهادی برنامه‌ی تولید در کنار برنامه سفارش دهی مواد اولیه مشخص می‌گردد. برنامه اصلی تولید می‌بایست در ابتدای افق تصمیم‌گیری مشخص شود. ازآنجاکه مدل در شرایط عدم قطعیت مدل‌سازی شده است، میزان تقاضای قطعی برآورده شده در مرحله دوم مشخص می‌شود و میزان انحرافات از سفارش‌ها پذیرفته‌شده به سیستم، هزینه تحمیل می‌نماید. شکل ۱ نشان‌دهنده‌ی ساختار فرایند تصمیم‌گیری هست.



شکل شماره (۱): ساختار فرایند تصمیم‌گیری مدل

ج) برنامه‌ریزی تصادفی دومرحله‌ای[2]

روش سنتی نمایش ریاضی برنامه‌ریزی احتمالی دو مرحله‌ای به شکل زیر است که در آن متغیرها و پارامترها مرحله‌ی اول و دوم طبق معادلات ۱ الی ۴ قابل تمایز می‌باشند.

$$\min\left\{a^{T}x+\sum_{s\in S}p^{s}\times b^{sT}\times y^{s}\right\} \qquad (۱)$$

[1] Random Yield
[2] Two-stage Stochastic Programming

to موضوع

$$Ax = c \quad (۲)$$

$$B^s x + C^s \times y^s = d^s, s \in S \quad (۳)$$

$$x, y^s \geq 0, s \in S \quad (۴)$$

در مدل‌بالا مقادیر x و y به ترتیب متغیرهای مرحله‌ی اول و دوم می‌باشند. A، B و C ضرایب ماتریس‌های تکنولوژی می‌باشد. c و d مقادیر سمت راست می‌باشد و s نمایانگر سناریوی مربوطه است. pنیز احتمال مجموعه‌ی سناریو می‌باشد.

د) مدل تصادفی دومرحله‌ای ارائه‌شده توسط رحیمی منش و همکاران (Rahimimanesh et al, 2020)

طبق فرضیات ارائه‌شده در بخش قبلی مدل‌سازی مسئله به شکل زیر صورت می‌پذیرد. در ادامه اندیس‌ها، پارامترها، متغیرها و مدل‌سازی مسئله ارائه گردیده است.

اندیس‌ها

اندیس ماده اولیه موردنیاز برای تولید	**i**
اندیس محصولات جهت تولید	p
اندیس سفارش‌ها ارسالی	o
اندیس تأمین‌کننده‌ی ارزان غیرمطمئن	c
اندیس تأمین‌کننده‌ی گران مطمئن	e
اندیس پریود $(\mathbf{t = 1, 2, \dots, T})$	t
اندیس سناریو	s

مجموعه‌ها

مجموعه محصولاتی که تولید آن‌ها در تصمیم‌گیری موردبررسی تعمیر قرار می‌گیرند.	**P**
مجموعه‌ی سناریوهای قابل وقوع	S
مجموعه مواد اولیه موردنیاز برای تولید محصول **p**	$IT(p)$
مجموعه تأمین‌کننده ارزان که می‌توانند ماده اولیه **i** از محصول **p**را ارائه دهند	$C(i, p)$
تأمین‌کننده‌ی گران که می‌تواند ماده اولیه **i** از محصول **p**را ارائه دهند	$E(i, p)$

پارامترها

احتمال سناریو **s**	$\mathbf{PRS_s}$
هزینه نگه‌داری یک واحد محصول **p** در دوره‌ی **t**	$HP_{p,t}$
عایدی حاصل از فروش یک واحد محصول **p**	RO_p
هزینه تولید یک واحد محصول **p**	PC_p
هزینه رزرو یک واحد از ماده اولیه **i** برای محصول **p** از تأمین‌کننده‌ی گران **e** در دوره‌ی **t**	$RC_{i,p,e,t}$
قیمت واحد آیتم **i** برای محصول **p** از تأمین‌کننده‌ی ارزان **c** برای تحویل در دوره‌ی **t**	$CP_{i,p,c,t}$
قیمت واحد آیتم **i** برای محصول **p** از تأمین‌کننده‌ی گران **e** برای تحویل در دوره‌ی **t**	$EP_{i,p,e,t}$
ارزش دفتری ماده اولیه‌ی **i** از محصول **p** در ابتدای افق تصمیم‌گیری	$BI_{i,p}$
ارزش دفتری ماده اولیه‌ی **i** از محصول **p** در انتهای افق تصمیم‌گیری	$BE_{i,p}$
موجودی اولیه ماده اولیه‌ی **i** از محصول **p**	$II_{i,p}$
هزینه نگهداری یک واحد از ماده اولیه‌ی **i** برای یک دوره	H_i
بازده ماده اولیه‌ی **i** در پریود **t** از **c** برای سناریوی **s**	$y_{i,c,t,s}$
متوسط بازده ماده اولیه‌ی **i** متعلق به محصول **p**از تأمین‌کننده رزان **c**	$\bar{y}_{i,p,c}$
حداقل درصدی از مقدار رزرو شده از ماده اولیه‌ی **i** ازتأمین‌کنندهگران**e** که باید سفارش داده‌شود.	$\alpha_{i,e}$
حداقل مقدار موردنیاز از ماده اولیه‌ی **i** از محصول **p** در پایان افق	$MIE_{i,p}$
حداکثر مقدار موردنیاز از آیتم **i** از محصول **p** در پایان افق	$MAE_{i,p}$
ظرفیت تأمین‌کننده‌ی **c** برای ماده اولیه‌ی **i** از محصول **p**	$CC_{i,p,c}$

$CE_{i,p,e}$	ظرفیت تأمین‌کننده‌ی **e** برای ماده اولیه‌ی **i** از محصول **p**
$B_{e,s}$	اگر تأمین‌کننده‌ی **e** در سناریوی **s** در دسترس باشد مقدار یک می‌گیرد. در غیر این صورت صفر
$\gamma_{i,p}$	مقدار موردنیاز از ماده اولیه‌ی **i** برای تولید یک واحد محصول **p**
$LDE_{i,p,e,s}$	زمان‌تدارک ماده اولیه‌ی **i** از محصول **p** از تأمین‌کننده‌ی **e** برای سناریوی **s**
$LDC_{i,j,p,c,s}$	زمان‌تدارک ماده اولیه‌ی **i** از محصول **p** از تأمین‌کننده‌ی **c** برای سناریوی **s**
PDP_p	میزان جریمه بابت تغییر مثبت (تولید زودتر) در برنامه‌ی تولید برای محصول **p**
NDP_p	میزان جریمه بابت تغییر منفی (انجام دیرتر) در برنامه‌ی تولید برای محصول **p**
RS_p	میزان موردنیاز نیروی انسانی برای تولید یک واحد محصول **p**
SC_t	ظرفیت موجود از نیروی انسانی در دوره‌ی **t**

متغیرهای مرحله‌ی اول

$\mathbf{AO_{p,t}}$	مقدار سفارش پذیرفته‌شده از محصول نوع **p** در دوره‌ی **t**
$RQ_{i,p,e,t}$	مقدار رزرو شده (پیش‌پرداخت شده) از ماده اولیه‌ی **i** برای محصول **p** از تأمین‌کننده‌ی **e** در دوره‌ی **t**
$OC_{i,p,c,t}$	میزان سفارش از ماده اولیه‌ی **i** از محصول**p**به تأمین‌کننده‌ی ارزان **c** برای دوره‌ی **t**
$IMP_{p,t}$	برنامه‌ی اولیه‌ی تولید محصول **p** در زمان **t**

متغیرهای مرحله‌ی دوم

$\mathbf{RP_{i,p,e,t,s}}$	میزان باقیمانده‌ی پرداخت که برای ماده اولیه **i** برای محصول **p** در دوره‌ی **t** برای سناریوی **s** در صورت تحویل کالا می‌بایست به تأمین‌کننده‌ی **e** پرداخته شود
$I_{i,p,t,s}$	سطح موجودی ماده اولیه‌ی **i** از محصول **p** در پایان دوره‌ی **t** برای سناریوی **s**
$IP_{p,t,s}$	سطح موجودی محصول نهایی محصول **p** در پایان دوره‌ی **t** برای سناریوی **s**
$AMP_{p,t,s}$	میزان قطعی تولید محصول **p** در زمان **t** برای سناریوی **s**
$OE_{i,p,e,t,s}$	میزان قطعی سفارش از ماده اولیه **i** از محصول **p** به تأمین‌کننده‌ی گران **e** برای دوره‌ی **t** برای سناریوی **s**
$C_{i,p,t,s}$	میزان مصرف‌شده از ماده اولیه **i** از محصول **p** در پایان دوره‌ی **t** برای سناریوی **s**
$LP_{i,j,p,e,t,s}$	میزان سرمایه‌گذاری که برای ماده اولیه **i** برای محصول**p** در دوره‌ی **t** برای سناریوی **s** از تأمین‌کننده‌ی **e** ازدست‌رفته است.
$DMP^{+}_{j,p,s}$	میزان تغییر مثبت (انجام زودتر) در برنامه‌ی تولید محصول **p** برای سناریوی **s**
$DMP^{-}_{j,p,s}$	میزان تغییر منفی (انجام دیرتر) در برنامه‌ی تولید محصول **p** برای سناریوی **s**

مدل‌سازی ریاضی

$$\text{Max}\left\{\begin{bmatrix}\sum_{p\in P}\sum_{t=1}^{T}(RO_p - PC_p)AO_{p,t}\\ -\sum_{p\in P}\sum_{i\in IT(p)}\sum_{e\in E(i,p)}\sum_{t=1}^{T}RC_{i,p,e,t}\times RQ_{i,p,e,t}\\ -\sum_{p\in P}\sum_{i\in IT(p)}\sum_{c\in C(i,p)}\sum_{t=1}^{T}CP_{i,p,c,t}\times \bar{y}_{i,p,c}\times OC_{i,p,c,t}\end{bmatrix}\right.$$
$$\left.-\sum_{s=1}^{S}PRS_s\times\begin{bmatrix}+\sum_{p\in P}\sum_{i\in IT(p)}\sum_{e\in E(i,p)}\sum_{t=1}^{T}RP_{i,p,e,t,s}\times OE_{i,p,e,t,s}\\ +\sum_{p\in P}\sum_{i\in IT(p)}(BI_{i,p}\times II_{i,p}-BE_{i,p}\times I_{i,p,T,s})\\ +\sum_{p\in P}\sum_{i\in IT(p)}\sum_{t=1}^{T}(H_{i,p}\times I_{i,p,t,s})\\ +\sum_{p\in P}\sum_{t=1}^{T}(HP_{p,t}\times IP_{p,t,s})\\ +\sum_{p\in P}\sum_{t=1}^{T}(PDP_p\times DMP^{+}_{p,t,s})\\ +\sum_{p\in P}\sum_{t=1}^{T}(NDP_p\times DMP^{-}_{p,t,s})\end{bmatrix}\right\} \quad (۱)$$

Subject to:

$$\begin{cases} II_{i,p}+\sum_{c\in C(i)}y_{i,p,c,1,s}\times OC_{i,p,c,1}+\sum_{e\in E(i)}OE_{i,p,e,1,s}=I_{i,p,1,s}+C_{i,p,1,s}, \\ \qquad \forall p\in P, i\in IT(p), s \\ I_{i,p,t-1,s}+\sum_{c\in C(i)}y_{i,p,c,t,s}\times OC_{i,p,c,t}+\sum_{e\in E(i)}OE_{i,p,e,t,s}=I_{i,p,t,s}+C_{i,p,t,s}, \\ \qquad \forall p\in P, i\in IT(p), t=2,\dots,T, s \end{cases} \quad (۲)$$

$$I_{i,p,T,s}\geq MIE_{i,p}, \quad \forall p\in P, i\in IT(p), s \quad (۳)$$

$$I_{i,p,T,s}\leq MAE_{i,p}, \quad \forall p\in P, i\in IT(p), s \quad (۴$$

$$\sum_{t=1}^{T}OC_{i,p,c,t}\leq CC_{i,p,c}, \quad \forall p\in P, i\in IT(p), c\in C(i) \quad (۵)$$

$$\sum_{t=1}^{T}RQ_{i,p,e,t}\leq CE_{i,p,e}, \quad \forall p\in P, i\in IT(p), e\in E(i) \quad (۴)$$

$$RC_{i,p,e,t}\times RQ_{i,p,e,t}+RP_{i,p,e,t,s}-LP_{i,p,e,t,s}=EP_{i,p,e,t}\times OE_{i,p,e,t,s}, \quad \forall p\in P, i\in IT(p), e\in E(i), t, s \quad (۵)$$

$$OE_{i,p,e,t,s}\leq B_{e,s}\times RQ_{i,p,e,t}, \quad \forall p\in P, i\in IT(p), t, e\in E(i), s \quad (۶)$$

$$\alpha_{i,p,e}\times B_{e,s}\times\sum_{t=1}^{T}RQ_{i,p,e,t}\leq\sum_{t=1}^{T}OE_{i,j,p,e,t,s}, \forall p\in P, j\in J(p), i\in IT(p), e\in E(i), s \quad (۷)$$

$$C_{i,p,t,s}=\gamma_{i,p}\times AMP_{p,t,s}, \forall p\in P, i\in IT(p), t, s \quad (۸)$$

$$\sum_{t=1}^{LDC_{i,p,c}}OC_{i,p,c,t}=0, \quad \forall p\in P, i\in IT(p), c\in C(i) \quad (۹)$$

$$\sum_{t=1}^{LDE_{i,p,e,s}} OE_{i,p,e,t,s} = 0, \qquad \forall p \in P, i \in IT(p), e \in E(i), s \tag{۱۰}$$

$$IP_{p,t-1,s} + AMP_{p,t,s} = IP_{p,t,s} + AO_{p,t}, \qquad \forall p \in P, t, s \tag{۱۱}$$

$$IMP_{p,t} - AMP_{p,t,s} = DMP^{+}_{p,t,s} - DMP^{-}_{p,t,s}, \forall p \in P, t, s \tag{۱۲}$$

$$\sum_{p \in P} RS_p \times IMP_{p,t} \leq SC_t, \qquad \forall t \tag{۱۳}$$

$$\sum_{p \in P} RS_p \times AMP_{p,t,s} \leq SC_t, \qquad \forall t, s \tag{۱۴}$$

$$RQ_{i,p,e,t}, OC_{ip,c,t}, IMP_{p,t}, RP_{i,p,e,t,s}, I_{i,p,t,s}, AMP_{p,t,s}, OE_{i,p,e,t,s}, C_{i,p,t,s}, DMP^{+}_{p,s}, DMP^{-}_{p,s} \geq 0 \tag{۱۵}$$

معادله‌ی ۵ نشان‌دهنده‌ی تابع هدف است که شامل عایدی منهای هزینه‌های مرحله اول و دوم است. معادله‌ی ۶ محدودیت بالانس موجودی مواد اولیه می‌باشد. معادله‌ی ۷ بیانگر این است که موجودی نهایی از یک ماده اولیه در پایان دوره از یک حد مشخصی بیشتر باشد. معادله‌ی۸ بیانگر آن است که موجودی نهایی از یک ماده اولیه در پایان دوره از یک حد مشخصی کمتر باشد. معادله‌ی شماره ۹ نشان می‌دهد که میزان سفارش داده شده به تامین‌کننده‌ی ارزان کمتر از ظرفیت تامین‌کننده‌ی ارزان است. معادله‌ی ۱۰ نشان می‌دهد که میزان رزرو شده از تامین‌کننده‌ی گران کمتر از ظرفیت تامین‌کننده‌ی گران است. معادله‌ی ۱۱ نشان‌دهنده‌ی پرداخت باقیمانده‌ی هزینه‌ی تامین از تامین‌کننده‌ی گران می‌باشد که البته برای برخی از سناریوها مقدار پیش‌پرداخت شده نیز از دست می‌رود. معادله‌ی۱۱ تضمین می‌نماید که میزان سفارش به تامین‌کننده‌ی گران از میزان رزرو شده کمتر می‌باشد. معادله‌ی ۱۳ در صورتی که تامین‌کننده‌ی گران در دسترس باقی بماند حداقل میبایست درصدی از کالای رزرو شده را خریداری نمود. معادله‌ی ۱۴ که درصورتی که برنامه‌ی تولید برای یک دوره‌ی خاص تعیین گردد، آنگاه می‌بایست مواد اولیه مربوط به آن تامین گردیده باشد. معادله‌ی ۱۵ نشان‌دهنده‌ی محدودیت زمان تدارک غیر قطعی برای تامین‌کننده‌ی ارزان می‌باشد.

ه) محدودیت‌های کارکردی مدل دومرحله‌ای تصادفی

برنامه‌ریزی احتمالی بر روی بهینه‌سازی معیارهای هزینه‌ای یا عملیاتی تمرکز می‌نماید. ممکن است این تفکر به وجود آید که مدل برای مقادیر میانگین پارامترهای غیرقطعی بهینه یا نزدیک بهینه عمل نماید ولی این امکان وجود دارد تا برای برخی از سناریوها (مثلاً بدترین سناریو[3]) مدل بسیار بدعمل نماید. همین‌طور این امکان وجود دارد برای برخی از سناریوها (مثلاً زمانی که بازده تأمین‌کننده‌های ارزان کم می‌باشد)، مدل تنها بخاطر کمبود یکی از اقلام، غیر شدنی شود یا تأثیر منفی قابل‌توجه داشته باشد. با توجه به اینکه مفاهیم استواری دقیقاً به تلاش در اصلاح چنین کاستی‌هایی می‌پردازد، سعی شده است تا با استفاده از مفاهیم استواری به توسعه‌ی مدل پرداخته شود.

و) توسعه‌ی مدل دومرحله‌ای تصادفی به مدل استواری

برنامه‌ریزی احتمالی و بهینه‌سازی استوار به‌منظور مدیریت عدم قطعیت و شدنی بودن محدودیت‌ها در ادبیات مربوطه مورداستفاده قرار می‌گیرند. مدل احتمالی دومرحله‌ای ارائه‌شده در بخش قبلی را در نظر می‌گیریم. این مدل استوار بهینه[4] است اگر برای سناریوهای قابل وقوع، جواب‌ها، نزدیک بهینه باقی بماند. چنین ویژگی‌ای استواری جواب[5] نامیده می‌شود. به‌عبارت‌دیگر استواری جواب سعی در کاهش تغییرپذیری مدل احتمالی برای $s \in S$ دارد. علاوه بر این مدل زمانی که برای تمامی سناریوها، تقریباً شدنی باقی بماند، مدل نسبت به شدنی بودن استوار است که آن را استواری مدل[6] می‌نامند. همتای استوار مدل جنرال احتمالی دومرحله‌ای به شکل زیر قابل فرموله سازی می‌باشد.

[3]Worst-case Scenario
[4]Robust Optimal
[5]Solution Robustness
[6]Model Robustness

$$\min\left\{a^{T}x+\sum_{s\in S}p^{s}\times b^{s^{T}}\times y^{s}+\lambda\times\sigma(y^{1},\dots,y^{S})+\omega\times\rho(\delta^{1},\dots,\delta^{S})\right\} \quad (۱۶)$$

subject to

$$Ax=c$$
$$B^{s}x+C^{s}\times y^{s}+\delta^{s}=d^{s},s\in S$$
$$x,y^{s}\geq 0,s\in S$$

که در مدل بالا$\sum_{s\in S}p^{s}\times b^{s^{T}}\times y^{s}+\lambda\times\sigma(y^{1},\dots,y^{S})$ بیانگر استواری جواب برای تابع هدف است و λ ضریب برنامه‌ریزی آرمانی است که اهمیت نسبی معیار تغییرپذیری برای تصمیم‌گیرنده را نمایش می‌دهد و $\sigma(y^{1},\dots,y^{S})$سنجه‌ی تغییرپذیری برای بخش مرحله‌ی دوم مدل است. درنهایت $\rho(\delta^{1},\dots,\delta^{S})$تابع جریمه‌ای است که تخطی محدودیت غیرقطعی را حداقل می‌نماید و ωهم ضریب اهمیت برنامه‌ریزی آرمانی مربوطه است. به‌منظور تعبیر استواری مدل مربوطه جهت شدنی بودن، زمانی مدل ممکن است نشدنی گردد که میزان دریافتی از تأمین داده‌شده ها از مقدار سفارش داده‌شده کمتر باشد. این امر به‌طور مستقیم بر روی معادلات تعادل و معادلات مربوط به رابطه‌ی بین برنامه‌ی تعمیرات و مصرف اقلام (معادلات ۶ و ۱۴) اثرگذار است. ازآنجایی‌که در صورت کمبود هرکدام از آیتم‌ها برای بدترین سناریوها امکان تأمین این اقلام از تأمین‌کننده‌های دیگر به‌طور موقت باقیمت واحد بسیار بالاتر وجود خواهد داشت ولی به‌طور عادی نمی‌بایست بر روی آن‌ها اتکا نمود، معادله‌ی مصرف اقلام یدکی (معادله ۱۴) به معادله‌ی (۱۷) تغییر می‌کند. معادله‌ی (۱۴) نشان‌دهنده‌ی این است که میزان موردنیاز در فرآیند تعمیرات باید تأمین گردند.

$$C_{i,p,t,s}+\delta_{i,p,t,s}=\gamma_{i,p}\times AMP_{p,t,s},\forall p\in P,,i\in IT(p),s \quad (۱۷)$$

همین‌طور ترم $\rho(\delta^{1},\dots,\delta^{S})$ به شکل زیر به تبدیل می‌گردد.

$$\rho(\delta^{1},\dots,\delta^{S})=\sum_{s=1}^{S}p^{s}\times\sum_{p\in P}\sum_{i\in IT(p)}\sum_{t=1}^{T}EC_{i,p}\times\delta_{i,p,t,s} \quad (۱۸)$$

که $EC_{i,p}$ هزینه‌ی واحد تأمین کالا به‌صورت خارج از حالت عادی و از تأمین‌کننده‌هایی می‌باشد که به‌طورمعمول خرید از آن‌ها با توجه به قیمت آن‌ها صورت نمی‌پذیرد. معیارهای تغییرپذیری متنوعی بهینه‌سازی استوار مورداستفاده قرارگرفته است. معیار میانگین واریانس مارکویتز (Markowitz, 1959)، به‌طور گسترده‌ای در این حوزه مورداستفاده قرارگرفته است. این معیار در مسائلی نظیر توسعه‌ی ظرفیت (Malcolm & Zenios, 1994)، مسائل لجستیک (Yu & Li, 2000) برنامه‌ریزی تولید (Leung et al.,2007; Leung& Wu, 2004) و ... مورداستفاده قرارگرفته است. با توجه به محدودیت‌های فعلی برای نرم‌افزار بهینه‌سازی درجه دوم[۷]، امکان حل مسائل با ابعاد بزرگ وجود ندارد (Yu & Li, 2000). یک تبدیل نوعی از معیار واریانس به معیارهای قابل‌تبدیل به مدل خطی که منعکس‌کننده‌ی انحرافات متقارن از میانگین است، در معادله (۱۹) فراوان است.

$$\sigma(y^{1},\dots,y^{S})=\sum_{s\in S}p^{s}\times\left|\left(a^{T}x+b^{s^{T}}\times y^{s}\right)-\sum_{s'\in S}p^{s'}\times\left(a^{T}x+b^{s'^{T}}\times y^{s'}\right)\right| \quad (۱۹)$$

که در عبارت بالا $\left|\left(a^{T}x+b^{s^{T}}\times y^{s}\right)-\sum_{s'\in S}p^{s'}\times\left(a^{T}x+b^{s'^{T}}\times y^{s'}\right)\right|$ بیانگر میزان انحراف تابع هدف هر سناریو از مقدار میانگین تابع هدف می‌باشد.

- انحراف پایین‌تر از میانگین[۸]

[7] quadratic solvers
[8] Lower Mear Deviation(LMD)

بسیاری از تصمیم‌گیرنده‌ها ترجیح می‌دهند که با استفاده از معیار تغییرپذیری منفی، تغییرپذیری منفی هرکدام از رخدادها را نسبت به میانگین حداقل نمایند. با توجه به اینکه معیار مدل ارائه‌شده حداکثر سازی سود است سعی می‌گردد تا انحراف منفی از مقدار میانگین حداقل. این معیار طبق معادله (۲۰) قابل‌محاسبه است.

$$\sigma(y^1,\dots,y^S)=\sum_{s\in S}p^s\times\max\left(0,\left(a^Tx+b^{s^T}\times y^s\right)-\sum_{s'\in S}p^{s'}\times\left(a^Tx+b^{s'^T}\times y^{s'}\right)\right) \quad (۲۰)$$

به‌منظور ساده‌سازی فرمول ارائه‌شده در بالا می‌توان از محدودیت و $\sigma(y^1,\dots,y^S)$به شکل زیر استفاده نمود.

$$Q^-=\left(\left(\left[\begin{array}{c}\sum_{p\in P}\sum_{t=1}^{T}(RO_p-PC_p)\boldsymbol{AO_{p,t}}\\-\sum_{p\in P}\sum_{i\in IT(p)}\sum_{e\in E(i,p)}\sum_{t=1}^{T}RC_{i,p,e,t}\times RQ_{i,p,e,t}\\-\sum_{p\in P}\sum_{i\in IT(p)}\sum_{c\in C(i,p)}\sum_{t=1}^{T}CP_{i,p,c,t}\times\bar{y}_{i,p,c}\times OC_{i,p,c,t}\end{array}\right]-PRS_s\times\left[\begin{array}{c}+\sum_{p\in P}\sum_{i\in IT(p)}\sum_{e\in E(i,p)}\sum_{t=1}^{T}RP_{i,p,e,t,s}\times OE_{i,p,e,t,s}\\+\sum_{p\in P}\sum_{i\in IT(p)}(BI_{i,p}\times II_{i,p}-BE_{i,p}\times I_{i,p,T,s})\\+\sum_{p\in P}\sum_{i\in IT(p)}\sum_{t=1}^{T}(H_{i,p}\times I_{i,p,t,s})\\+\sum_{p\in P}\sum_{t=1}^{T}(HP_{p,t}\times IP_{p,t,s})\\+\sum_{p\in P}\sum_{t=1}^{T}(PDP_p\times DMP^{+}_{p,t,s})\\+\sum_{p\in P}\sum_{t=1}^{T}(NDP_p\times DMP^{-}_{p,t,s})\end{array}\right]\right)\right)$$

$$-\left(\left[\begin{array}{c}\sum_{p\in P}\sum_{t=1}^{T}(RO_p-PC_p)\boldsymbol{AO_{p,t}}\\-\sum_{p\in P}\sum_{i\in IT(p)}\sum_{e\in E(i,p)}\sum_{t=1}^{T}RC_{i,p,e,t}\times RQ_{i,p,e,t}\\-\sum_{p\in P}\sum_{i\in IT(p)}\sum_{c\in C(i,p)}\sum_{t=1}^{T}CP_{i,p,c,t}\times\bar{y}_{i,p,c}\times OC_{i,p,c,t}\end{array}\right]-\sum_{s'=1}^{S}PRS_{s'}\times\left[\begin{array}{c}+\sum_{p\in P}\sum_{i\in IT(p)}\sum_{e\in E(i,p)}\sum_{t=1}^{T}RP_{i,p,e,t,s'}\times OE_{i,p,e,t,s'}\\+\sum_{p\in P}\sum_{i\in IT(p)}(BI_{i,p}\times II_{i,p}-BE_{i,p}\times I_{i,p,T,s'})\\+\sum_{p\in P}\sum_{i\in IT(p)}\sum_{t=1}^{T}(H_{i,p}\times I_{i,p,t,s'})\\+\sum_{p\in P}\sum_{t=1}^{T}(HP_{p,t}\times IP_{p,t,s'})\\+\sum_{p\in P}\sum_{t=1}^{T}(PDP_p\times DMP^{+}_{p,t,s'})\\+\sum_{p\in P}\sum_{t=1}^{T}(NDP_p\times DMP^{-}_{p,t,s'})\end{array}\right]\right)$$

$$\sigma(y^1,\dots,y^S)=\textstyle\sum_{s\in S}p^s\times Q^- \quad (۲۱)$$

- انحراف پایین‌تر از آرمان[9]

برخلاف مدل با انحراف بالاتر از میانگین (LMD) ممکن است که تصمیم‌گیرنده بجای میانگین، آرمان از پیش تعیین‌شده‌ای را به‌عنوان هدف در نظر بگیرد که سعی بر این دارد که سناریوهایی که هزینه‌های آن بیشتر از این مقدار آرمان است، کمتر نماید. در چنین حالتی یک مقدار هدف به‌عنوان مرجع[10] در نظر گرفته می‌شود. معیار انحراف پایین‌تر از آرمان (LTD) طبق معادله‌ی (۲۲) قابل‌محاسبه است.

$$\sigma(y^1,\dots,y^S)=\sum_{s\in S}p^s\times\max\left(0,\left(a^Tx+b^{s^T}\times y^s\right)-R^*\right) \quad (۲۲)$$

در معادله‌ی بالا R^* مقدار هدفی (آرمانی) است که سعی می‌گردد تا انحراف مثبت از آن حداقل گردد. مشابه بخش قبل برای سادگی مسئله از محدودیت و $\sigma(y^1,\dots,y^S)$به شکل زیر می‌توان استفاده کرد.

[9] Lower Target Deviation(LMD)
[10] Reference

$$P^+ - Q^- = \left(\left(\begin{bmatrix} \sum_{p\in P}\sum_{t=1}^{T}(RO_p - PC_p)\boldsymbol{AO_{p,t}} \\ -\sum_{p\in P}\sum_{i\in IT(p)}\sum_{e\in E(i,p)}\sum_{t=1}^{T} RC_{i,p,e,t}\times RQ_{i,p,e,t} \\ -\sum_{p\in P}\sum_{i\in IT(p)}\sum_{c\in C(i,p)}\sum_{t=1}^{T} CP_{i,p,c,t}\times \bar{y}_{i,p,c}\times OC_{i,p,c,t} \end{bmatrix} - PRS_s \right) \times \left(\begin{bmatrix} +\sum_{p\in P}\sum_{i\in IT(p)}\sum_{e\in E(i,p)}\sum_{t=1}^{T} RP_{i,p,e,t,s}\times OE_{i,p,e,t,s} \\ +\sum_{p\in P}\sum_{i\in IT(p)}\left(BI_{i,p}\times II_{i,p} - BE_{i,p}\times I_{i,p,T,s}\right) \\ +\sum_{p\in P}\sum_{i\in IT(p)}\sum_{t=1}^{T}\left(H_{i,p}\times I_{i,p,t,s}\right) \\ +\sum_{p\in P}\sum_{t=1}^{T}\left(HP_{p,t}\times IP_{p,t,s}\right) \\ +\sum_{p\in P}\sum_{t=1}^{T}\left(PDP_p\times DMP^{+}_{p,t,s}\right) \\ +\sum_{p\in P}\sum_{t=1}^{T}\left(NDP_p\times DMP^{-}_{p,t,s}\right) \end{bmatrix} \right) \right) - R^*$$

$$\sigma(y^1,\dots,y^S) = \sum_{s\in S} p^s \times Q^- \qquad (۲۳)$$

۳- نتایج و بحث

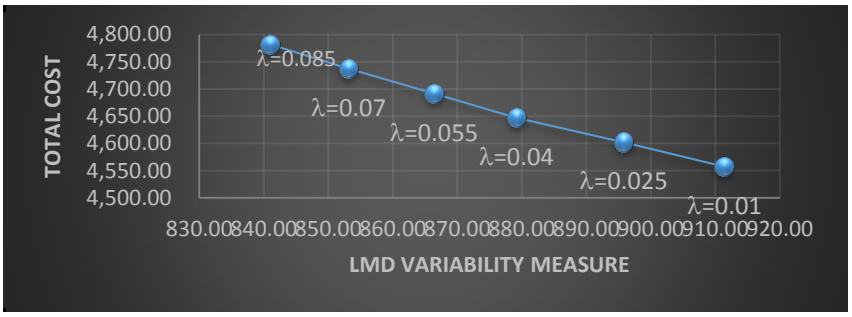
این پژوهش به بررسی اختلالات موجودی در سازمان‌ها می‌پردازد و از تجربه یک پیمانکار بزرگ در صنایع تعمیرات پالایشگاهی استفاده می‌کند. نتایج نشان می‌دهد که به دلیل هزینه بالای اقلام یدکی، مدیریت بهینه موجودی ضروری است. تحلیل بر روی ۱۲۶ نوع قطعه یدکی انجام‌شده و برای هر قلم کالا حداقل یک تأمین‌کننده وجود دارد. همچنین، ۵۴۹۱۵ سناریو برای بهینه‌سازی زنجیره تأمین ایجادشده و مدل با نرم‌افزار GAMS حل‌شده است. این نتایج می‌تواند به توسعه استراتژی‌های مؤثر در مدیریت اختلالات موجودی کمک کند. برای تحلیل مدل دومرحله‌ای از عدم قطعیت استوار استفاده‌شده است. اگرچه نتایج مدل دومرحله‌ای تصادفی ساده دارای مزیت است ولی معایبی نیز دارد به‌عنوان نمونه مدل دومرحله‌ای تصادفی تغییرپذیری را در نظر نمی‌گیرد که این امر موجب می‌گردد برای برخی از سناریوها، خروجی‌ها با اختلاف قابل‌توجهی بدست‌آید که قابل‌قبول نیست. به دلیل اینکه برخی از سناریوهای بد بر روی کل مدل اثر نامطلوب قابل‌توجهی می‌گذارند، می‌بایست در عمل با در نظر گرفتن معیار استواری جواب این ایراد مرتفع می‌گردد. مدل بهینه‌سازی استوار به دنبال ارائه راه‌حل‌هایی است که در برابر عدم قطعیت‌ها مقاوم باشند. در این مدل، به‌جای تمرکز بر یک سناریو خاص، مجموعه‌ای از سناریوهای ممکن در نظر گرفته می‌شود تا از ریسک‌های ناشی از تغییرات جلوگیری شود. معیار LMD به حداکثر سازی سود و کاهش انحرافات منفی از میانگین می‌پردازد، درحالی‌که معیار LTD به تصمیم‌گیرنده این امکان را می‌دهد که یک هدف آرمانی مشخص را تعیین کند و تلاش کند تا سناریوهایی که هزینه‌های آن‌ها بالاتر از این هدف هستند، کاهش یابد.

الف) معیار LMD

نتایج مدل برای سنجه‌ی LMD در جدول شماره ۲ نمایش داده‌شده است. مشخص است که با افزایش مقدار λ که بیان‌کننده‌ی اهمیت استواری جواب است، مقدار شاخص تغییرپذیری LMD عملاً کاهش می‌یابد. همین‌طور با افزایش مقدار λ هزینه‌ی سفارش دهی به تأمین‌کننده‌ی ارزان کاهش و میزان سفارش دهی به تأمین‌کننده‌ی گران افزایش می‌یابد. هزینه‌ی کلی سفارش دهی نیز با افزایش مقدار λ افزایش می‌یابد. این امر نشان‌دهنده‌ی این مطلب است که با افزایش مقدار λ مدل به این سمت می‌رود تا با استفاده از تأمین‌کننده‌ی گران بجای تأمین‌کننده‌ی ارزان که مطمئن‌تر است به برآورده سازی تقاضا بپردازد. با توجه به افزایش استفاده از تأمین‌کننده‌ی مطمئن‌تر با افزایش λ عملاً هزینه‌ی نگهداری موجودی کاهش می‌یابد. البته با توجه به اینکه افق تصمیم‌گیری عملاً افق کوتاه‌مدت است هزینه‌های نگهداری موجودی بخش نسبتاً کوچکی از کل هزینه‌ها را تشکیل می‌دهد. شکل ۲ نشان‌دهنده‌ی رابطه‌ی بین هزینه‌ی کل در قبال شاخص تغییرپذیری می‌باشد.

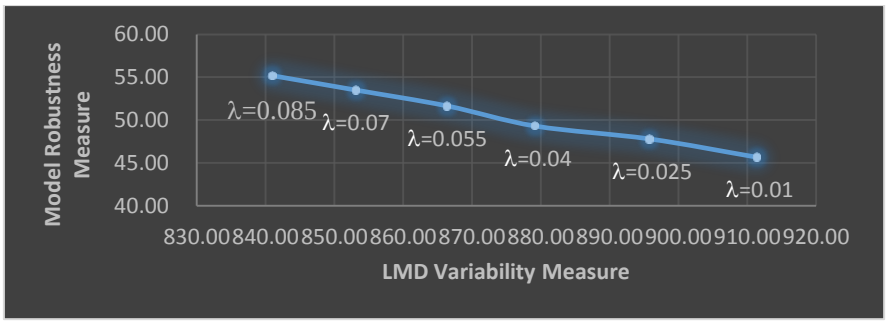
جدول شماره (۲): خلاصه‌ی نتایج برای مدل با سنجه‌ی تغییرپذیری LMD

λ	Cheap Supplier Ordering Expenses	Expected Expensive Supplier Ordering Expenses	Expected Inventory Holding Cost	Cost of Deviation in Maintenance Program	Model Robustness Measure	Expected Variability Measure
۰/۰۱	۳۴۹۵/۸۲	۸۵۴/۴۸	۱۹۱/۹۸	۱۴/۸۹	۴۵/۶۶	۹۱۱/۴۳
۰/۰۲۵	۶۲/۳۴۸۷	۹۱۳/۷۶	۱۸۶/۱۷	۱۴/۷۸	۴۷/۸۰	۸۹۵/۸
۰/۰۴	۳۴۸۰/۲۷	۹۷۱/۷۲	۱۸۰/۵۱	۱۴/۳۱	۴۹/۳۰	۸۷۹/۲۰
۰/۰۵۵	۳۴۷۳/۲۰	۱۰۲۵/۲۴	۱۷۹/۳۵	۱۴/۰۸	۵۱/۶۵	۸۶۶/۴۱
۰/۰۷	۳۴۵۸/۶۲	۱۰۸۴/۶۳	۱۷۹/۰۹	۱۴/۸۶	۵۳/۵۰	۸۵۳/۱۶
۰/۰۸۵	۳۴۴۸/۶۳	۱۱۴۳/۷۹	۱۷۵/۱۴	۱۴/۳۲	۵۵/۱۹	۸۴۰/۹۷



شکل شماره (۲): اثر دوجانبه‌ی تغییرپذیری و هزینه‌ی کل

واضح است که ضریب اهمیت استواری جواب(λ) در عمل با توجه به رویکرد و دیدگاه تصمیم‌گیرنده تعیین مینیاتورساز با افزایش ضریب اهمیت استواری جواب(λ)، مقدار معیار استواری مدل افزایش می‌یابد. در عمل مقدار معیار استواری مدل نشان‌دهنده‌ی سطح برآورده نشده از آیتم‌های موردنیاز، کمبود، دیرکرد در تأمین اقلام، خرید خارج از برنامه و یا تعبیرات مشابه هست به‌گونه‌ای که هرچه این شاخص بیشتر باشد عملاً سطح سرویس کمتری برآورده شده است؛ بنابراین اگر تصمیم‌گیرنده به دنبال سطح معیار استواری مدل کمتر (سطح سرویس بیشتر) باشد می‌بایست از مقدار کم ضریب اهمیت استواری جواب(λ) استفاده نماید ولی درصورتی‌که تصمیم‌گیرنده به دنبال کاهش تغییرپذیری مدل برای سناریوهای مختلف باشد، می‌بایست از مقدار بالای ضریب اهمیت استواری جواب(λ) استفاده نماید. شکل ۳ نشان‌دهنده‌ی رابطه‌ی سنجه‌ی استواری مدل در قبال سنجه‌ی تغییرپذیری LMD هست.



شکل شماره (۳): رابطه‌ی سنجه‌ی استواری مدل با سنجه‌ی تغییرپذیری LMD

این‌گونه می‌توان نتیجه‌گیری نمود که اگرچه با افزایش مقدار(λ) مقدار سنجه‌ی تغییرپذیری کاهش می‌یابد ولی در عمل سطح پایین‌تری از سطح سرویس قابل حصول است.

ب) معیارLTD

در این پژوهش مقدار این معیار (R^*) از مدل دو–مرحله‌ای خام به‌دست‌آمده است به‌گونه‌ای که در عمل مقدار این سنجه با ضرب این ضریب در مقدار تابع هدف به‌دست‌آمده از مدل دومرحله‌ای قابل حصول است. به‌عنوان نمونه منظور از $R^* = 1.02$ این است که مقدار تابع هدف به‌دست‌آمده از مدل دومرحله‌ای را در ۱/۰۲ ضرب نموده و مقدار به دست آمده را می‌بایست به عنوان هدف در نظر گرفت. به منظور نمایش اثر مدل نسبت به مقادیر مختلف برایR^* و λ بازه ای از این مقادیر انتخاب و مقایسه گردیده‌اند تا تصمیم‌گیرنده بتواند با توجه به شرایطی که در آن قرار دارد، مقادیر مناسب را برای آنها انتخاب کند. اگرچه انتخاب بازه برایR^* و λ می‌تواند بسته به نظر تصمیم‌گیرنده‌های مختلف تغییرکند، در این بخش هدف اصلی ملاحظه‌ی روندهای ایجاد شده برای مقادیر مختلف این پارامترها می‌باشد. در عمل می‌توان بازه این پارامترها را با توجه به رویکرد تصمیم‌گیرنده تغییر داد. از آنجایی که هدف مسئله کاهش هزینه‌ها می‌باشد، بنابراین منطقی است که آرمان مورد استفاده برای مدل PUDT مقادیر کوچکتر یا مساوی هزینه‌ی مدل دو مرحله‌ای خام را شامل شود. بنابر این در این پژوهش از مقادیر ۱، ۰/۹۸، ۰/۹۶، ۰/۹۴، ۰/۹۲ و ۰/۹۰ برایR^* اهمین‌طورگردیده است. همینطور مقادیر مورد استفاده برای λ مشابه با مدل PUDM در نظر گرفته شده‌است. به منظور بررسی دقیق رفتار اجزاء مدل نسبت به تغییر درR^* و λ اجزائ ۱– هزینه‌ی سفارش‌دهی به تأمین کننده‌ی ارزان ۲– هزینه‌ی سفارشدهی به تأمین‌کننده‌ی گران ۳– هزینه‌ی نگهداری موجودی ۴– هزینه‌ی تغییرات در برنامه‌ی تعمیرات ۵–سنجه‌ی استواری مدل ۶–سنجه‌ی تغییرپذیری مدل به طور مجزا در نظر گرفته شده‌اند. نتایج در جدول شماره ۳ قابل ملاحظه است.

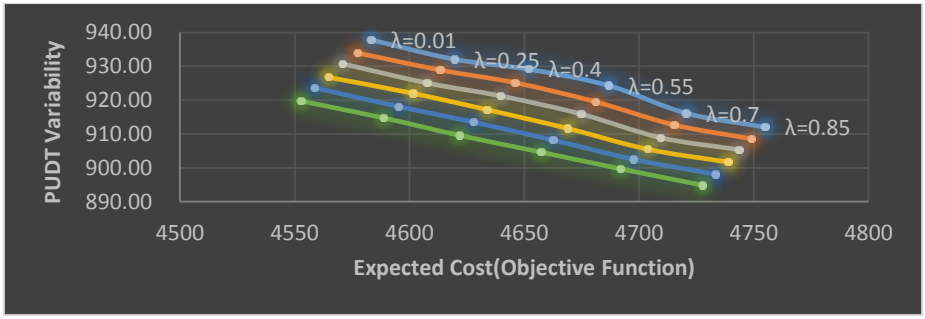
جدول شماره (۳): خلاصه‌ی نتایج برای مدل با سنجه‌ی تغییرپذیری PUDT

R^*	λ	Cheap Supplier Ordering Expences	Expected Expensve Supplier Ordering Expences	Expected Inventory Holding Cost	Cost of Deviation in Maintenance Program	Model Robustness Measure	Expected Variability Measure
$R^* = 1.1$	۰/۰۱	۳۳۵۵/۹۵	۱۰۶۷.۵۵	۱۴۸.۶۹	۱۱.۰۵	۸۸.۰۲	۹۳۷.۷۸
	۰/۰۲۵	۳۳۴۷/۸۹	۱۱۲۹/۱۸	۱۳۲/۷۵	۹/۷۰	۸۹/۷۹	۹۳۲/۰۵
	۰/۰۴	۳۳۴۳/۴۰	۱۱۸۶/۴۵	۱۱۳/۹۰	۸/۱۵	۹۱/۳۱	۹۲۹/۱۱
	۰/۰۵۵	۳۳۴۳/۲۲	۱۲۴۰/۴۷	۱۰۳/۹۹	۸/۰۰	۹۲/۰۴	۹۲۴/۳۱
	۰/۰۷	۳۳۲۲/۰۹	۱۳۰۰/۲۷	۹۱/۳۱	۶/۹۱	۹۴/۷۸	۹۱۶/۱۱
	۰/۰۸۵	۳۳۰۸/۲۹	۱۳۶۰/۹۷	۷۹/۶۰	۶/۰۶	۹۶/۴۲	۹۱۲/۰۰
$R^* = 1.08$	۰/۰۱	۳۳۷۰/۵۷	۱۰۴۴/۲۱	۱۵۱/۶۵	۱۰/۹۴	۹۷/۷۱	۹۳۳/۹۶
	۰/۰۲۵	۳۳۶۲/۸۱	۱۱۰۴/۳۷	۱۳۶/۰۱	۱۰/۱۷	۸۱/۴۹	۹۲۸/۸۸
	۰/۰۴	۳۳۵۷/۱۸	۱۱۶۴/۱۱	۱۱۶/۰۳	۸/۷۸	۸۳/۵۳	۹۲۵/۱۳
	۰/۰۵۵	۳۳۴۸/۶۱	۱۲۱۶/۰۵	۱۰۸/۵۵	۷/۹۸	۸۴/۱۶	۹۱۹/۴۸

	۰/۰۷	۳۳۳۶/۸۲	۱۲۷۵/۶۸	۹۵/۸۲	۷/۱۱	۸۶/۵۲	۹۱۲/۶۶
	۰/۰۸۵	۳۳۲۲/۲۸	۱۳۳۷/۶۰	۸۳/۰۹	۶/۱۹	۸۸/۲۳	۹۰۸/۵۵
$R^* = 1.06$	۰/۰۱	۳۳۸۵/۴۳	۱۰۲۱/۶۷	۱۵۲/۶۸	۱۱/۱۴	۷۲/۸۷	۹۳۰/۷۳
	۰/۰۲۵	۳۳۷۶/۷۹	۱۰۸۰/۴۸	۱۳۹/۸۸	۱۰/۵۳	۷۴/۲۴	۹۲۵/۰۵
	۰/۰۴	۳۳۷۰/۳۶	۱۱۴۰/۰۷	۱۲۰/۱۵	۹/۱۶	۷۶/۹۶	۹۲۱/۲۳
	۰/۰۵۵	۳۳۶۲/۶۴	۱۱۹۲/۲۵	۱۱۱/۸۳	۸/۰۸	۷۷/۳۳	۹۱۵/۸۸
	۰/۰۷	۳۳۵۱/۸۱	۱۲۵۳/۱۵	۹۶/۹۰	۷/۴۸	۷۹/۵۵	۹۰۸/۹۰
	۰/۰۸۵	۳۳۳۶/۳۶	۱۳۱۲/۵۹	۸۸/۲۸	۵۱/۶	۸۱/۰۹	۹۰۵/۳۴
$R^* = 1.04$	۰/۰۱	۳۳۹۹/۱۱	۹۸۸/۶۱	۱۵۵/۷۰	۱۱/۲۸	۶۶/۱۶	۹۲۶/۷۴
	۰/۰۲۵	۳۳۹۲/۱۶	۱۰۵۸/۶۵	۱۳۹/۸۳	۱۰/۸۹	۶۷/۸۸	۹۲۱/۹۸
	۰/۰۴	۳۳۸۵/۲۳	۱۱۶۲/۱۲	۱۲۲/۶۸	۹/۷۲	۶۹/۹۵	۹۱۷/۱۷
	۰/۰۵۵	۳۳۷۶/۸۹	۱۱۶۹/۳۰	۱۱۳/۷۴	۸/۸۲	۷۱/۲۲	۹۱۱/۶۶
	۰/۰۷	۳۳۶۴/۶۶	۱۲۳۰/۱۷	۱۰۰/۷۰	۸/۱۸	۷۳/۱۰	۹۰۵/۴۸
	۰/۰۸۵	۳۳۵۲/۰۸	۱۲۸۸/۹۰۹	۹۰/۹۵	۶/۸۶	۷۴/۷۱	۹۰۱/۶۸
$R^* = 1.02$	۰/۰۱	۳۴۱۳/۳۱	۹۷۶/۶۴	۱۵۷/۳۸	۱۱/۴۵	۶۰/۴۴	۹۲۳/۶۴
	۰/۰۲۵	۳۴۰۷/۰۱	۱۰۳۳/۷۵	۱۴۳/۹۵	۱۰/۳۸	۶۱/۷۱	۹۱۸/۱۲
	۰/۰۴	۳۴۰۰/۲۸	۱۰۹۲/۲۳	۱۲۶/۰۳	۹/۳۵	۶۳/۷۰	۹۱۳/۵۰
	۰/۰۵۵	۳۳۹۱/۶۸	۱۱۴۵/۴۸	۱۱۶/۹۵	۸/۵۲	۶۵/۷۵	۹۰۸/۱۶
	۰/۰۷	۳۳۷۷/۷۰	۱۲۰۶/۲۹	۱۰۵/۵۰	۸/۳۰	۶۷/۱۷	۹۰۲/۴۸
	۰/۰۸۵	۳۳۶۶/۶۵	۱۲۶۴/۸۴	۹۵/۰۶	۶/۸۶	۶۹/۰۷	۸۹۸/۰۸
$R^* = 1.00$	۰/۰۱	۳۴۲۷/۷۳	۹۵۱/۶۸	۱۶۰/۹۰	۱۲/۴۵	۵۵/۲۲	۹۱۹/۷۱
	۰/۰۲۵	۳۴۲۱/۵۷	۱۰۱۰/۵۱	۱۴۶/۱۶	۱۰/۵۳	۵۷/۱۳	۹۱۴/۷۳
	۰/۰۴	۳۴۱۳/۵۶	۱۰۶۹/۵۸	۱۲۸/۷۶	۹/۸۹	۵۸/۸۵	۹۰۹/۵۷
	۰/۰۵۵	۳۴۰۶/۰۰	۱۱۲۲/۲۰	۱۱۹/۹۴	۹/۲۱	۶۰/۹۷	۹۰۴/۶۲
	۰/۰۷	۳۳۹۲/۱۰	۱۱۸۱/۶۲	۱۰۹/۹۰	۸/۲۷	۶۲/۷۵	۸۹۹/۷۱
	۰/۰۸۵	۳۳۸۱/۰۴	۱۲۴۱/۷۹	۹۷/۸۸	۷/۱۱	۶۴/۶۸	۸۹۴/۸۶

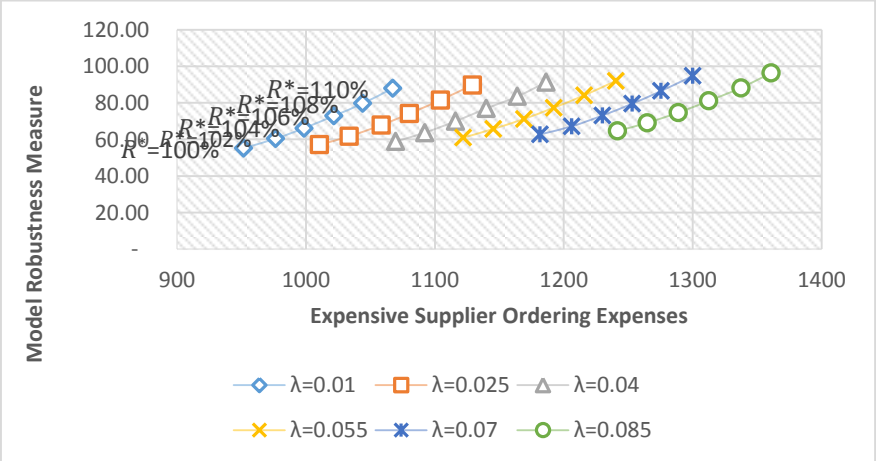
همان‌طور که انتظار می‌رود برای یک مقدار ثابت از R^*، هرچه مقدار λ افزایش می‌یابد، هزینه‌ی سفارش دهی به تأمین‌کننده‌ی ارزان کاهش می‌یابد. به‌طور معکوس با افزایش مقدار λ برای یک سطح خاص از R^* هزینه‌ی سفارش دهی به تأمین‌کننده‌ی گران در عمل افزایش همین‌طور هزینه‌ی کلی سفارش دهی نیز با افزایش λ یک سطح خاص از R^* افزایش می‌یابد که نشان از افزایش اتکا به تأمین‌کننده‌ی گران دارد. هزینه‌ی نگهداری موجودی برای یک سطح خاص از R^* نیز با افزایش λ کاهش می‌یابد که ناشی از کاهش متوسط موجودی نگهداری شده هست. میزان جریمه‌ی انحراف در برنامه‌ی تعمیرات نیز با افزایش λ کاهش می‌یابد. سنجه‌ی استواری مدل برای یک سطح خاص از R^* نیز با افزایش λ افزایش می‌یابد. در پایان مشخص است که برای یک سطح خاص از R^* با افزایش λ مقدار سنجه‌ی تغییرپذیری کاهش می‌یابد که ناشی از افزایش اهمیت کاهش تغییرپذیری برای تصمیم‌گیرنده هست. به‌طورکلی می‌توان دریافت که رفتار مدل برای تغییر λ برای یک سطح خاص از R^* برای مدل LTD با مدل LMD انطباق دارد. در این بخش به تحلیل رفتار مدل برای مقادیر مختلف R^* برای یک سطح خاص از λ می‌پردازیم. برای یک سطح خاص از λ با کاهش R^* در عمل مقدار هزینه‌ی سفارش دهی به تأمین‌کننده‌ی ارزان افزایش می‌یابد درحالی‌که هزینه‌ی سفارش دهی تأمین‌کننده‌ی گران کاهش می‌یابد. همین‌طور میزان هزینه‌ی کلی سفارش دهی مقدار R^* کاهش می‌یابد. با کاهش مقدار R^* برای یک سطح خاص از نگهداری موجودی افزایش می‌یابد. برای یک سطح خاص از λ با کاهش R^* مقدار هزینه‌ی کل کاهش می‌یابد. این رفتار به علت مدیریت کمتر تغییرپذیری برای مقادیر کوچک‌تر R^* هست گویی که اهمیت تغییرپذیری برای مسئله کاهش می‌یابد. برای یک سطح خاص از λ با کاهش R^* میزان سنجه‌ی استواری مدل

کاهش می‌یابد که این مطلب ناشی از کاهش سطح جواب‌هایی هست که در استواری مدل درگیر می‌گردند. در پایان قابل‌ملاحظه است که برای یک سطح خاص از λ با کاهش R^* مقدار سنجه‌ی تغییرپذیری کاهش می‌یابد که علت اصلی آن ثابت بودن آرمان می‌باشد، بنابراین با افزایش آرمان موردبررسی عملاً تعداد کمتری از سناریوها توسط این سنجه مدیریت می‌گردند. شکل ۴ نشان‌دهنده‌ی توازن بین سنجه‌ی تغییرپذیری LTD با تابع هدف انتظاری برای مقادیر مختلف R^* هست. می‌توان دید که با کاهش مقدار آرمان، تغییرپذیری کمتری برای تابع هدف به دست می‌آید. درصورتی‌که اولویت اول تصمیم‌گیرنده کاهش تابع هزینه باشد، می‌بایست از مقدار کمتر برای R^* استفاده نماید. از طرف دیگر با توجه به اینکه کاهش مقدار R^* موجب می‌گردد که تعداد سناریوی کمتری عملاً در محاسبات تغییرپذیری موردبررسی قرار بگیرد، مقدار عددی شاخص تغییرپذیری کاهش می‌یابد ولی در عمل افزایش مقدار R^* موجب می‌گردد که تغییرپذیری برای تعداد بیشتری از سناریوها مدنظر قرار گیرد.



شکل شماره (۴): اثر متقابل تابع هدف انتظاری با سنجه‌ی تغییرپذیری PUDT

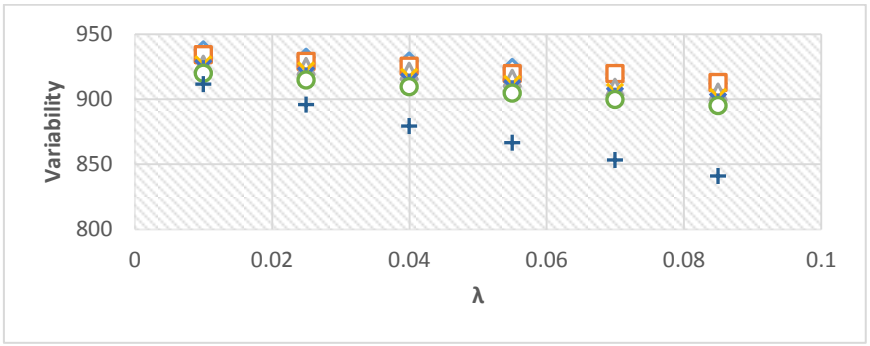
شکل ۵ نشان‌دهنده‌ی رابطه‌ی بین سنجه‌ی استواری مدل با هزینه‌های سفارش دهی به تأمین‌کننده‌ی گران هست. برای یک مقدار مشخص λ با کاهش مقدار R^* میزان سفارش دهی به تأمین‌کننده‌ی گران و سنجه‌ی استواری مدل به‌طور هم‌زمان افزایش می‌یابد. بهتر است از مقدار کم λ و مقدار کم R^* استفاده گردد. مشخص است که سنجه‌ی استواری مدل نشان‌دهنده‌ی عکس سطح سرویس هست چون در عمل این سنجه نمایش‌دهنده‌ی کمبود، دیرکرد، یا تقاضای برآورده نشده هست.



شکل شماره (۵): رابطه‌ی بین سنجه‌ی استواری مدل و هزینه‌های کل سفارش دهی

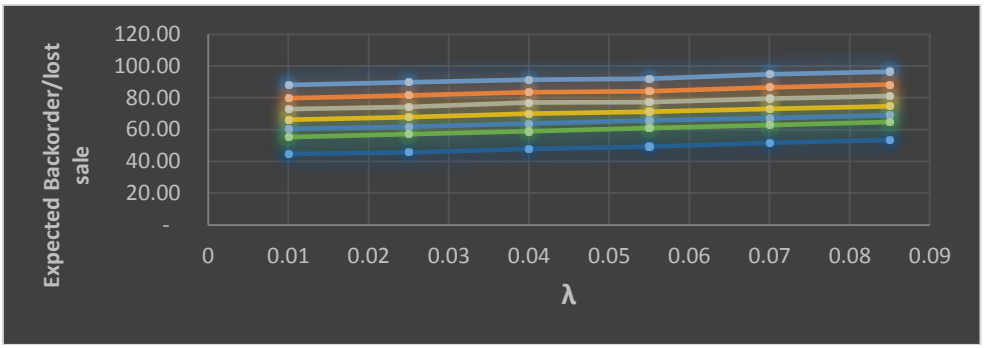
ج) مقایسه‌ی سنجه‌های LMD با LTD

همان‌گونه که انتظار می‌رود با توجه به اینکه مدل LMD در عمل به میانگین وابسته است درحالی‌که مدل LTD وابسته است به R^* و به همین دلیل عملاً درجه‌ی آزادی سنجه‌ی تغییرپذیری برای مدل LMD بیشتر می‌باشد که موجب می‌گردد در نتیجه‌ی آن، نرخ کاهش بیشتر در سنجه‌ی تغییرپذیری به ازای تغییر مقدار مشخص در λ حاصل شود. شکل ۶ نشان‌دهنده‌ی این مطلب می‌باشد.



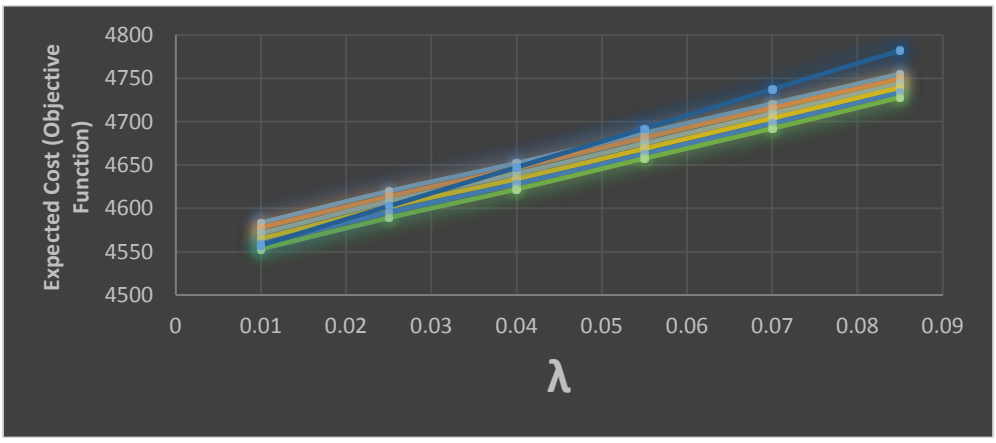
شکل شماره (۶): مقایسه‌ی تغییرپذیری مدل‌های موردبررسی در قبال مقادیر مختلف λ

شکل ۷ مقایسه‌ای از سنجه‌ی استواری مدل را فراهم می‌آورد مشخص است که مدل LMD مقدار سنجه‌ی استواری مدل کوچک‌تری را نسبت به مدل LTD فراهم می‌آورد. برای مدل LTD هرچه مقدار R^* کمتر می‌گردد مقدار کمتری برای سنجه‌ی استواری مدل به دست می‌آید. همین‌طور مقادیر کمتر λ منجر به سنجه‌ی استواری مدل کوچک‌تر می‌گردد. ازآنجایی‌که سنجه‌ی استواری مدل نشان‌دهنده‌ی دیرکرد، کمبود یا به‌طور خلاصه عکس سطح سرویس می‌باشد، تصمیم‌گیرنده‌ای که به دنبال حداکثر نمودن سطح سرویس می‌باشد می‌بایست از مقدار کم λ برای مدل LMD و یا از مدل LTD با مقدار کم λ و مقدار کم R^* استفاده نماید.



شکل شماره (۷): مقایسه‌ی سنجه‌ی استواری مدل در قبال مقادیر مختلف λ

شکل ۸ نشان‌دهنده‌ی رابطه‌ی بین هزینه‌ی کل با مدل استوار انتخابی می‌باشد. مشخص است که با افزایش مقدار λ مقدار تابع هدف کل نیز افزایش می‌یابد؛ بنابراین جدای از اینکه کدام‌یک از مدل‌های LMD یا LTD انتخاب گردند، اگر تصمیم‌گیرنده اولویت اصلی‌اش کاهش هزینه‌ی کل می‌باشد می‌بایست مقدار کم برای λ را مورداستفاده قرار دهد. همین‌طور مشخص است که با افزایش مقدار λ شیب افزایش هزینه‌ی کل برای مدل LMD نسبت به مدل LTD بیشتر است. برای مدل LTD هرچه مقدار R^* کمتر باشد مقدار کمتری برای تابع هدف کل قابل حصول است.



شکل شماره (۸): مقایسه‌ی تابع هزینه در قبال مقادیر مختلف λ

با توجه به وابستگی مدل دومرحله‌ای تصادفی به پارامترهای غیرقطعی (یا بدترین سناریو) و همین‌طور ضرورت شدنی بودن مدل برای بدترین سناریو، مدل استوار توسعه‌یافته برای مدل دومرحله‌ای تصادفی نیز ارائه گردیده است. نتایج مدل استوار شرایطی را نشان می‌دهد که تصمیم‌گیرنده با توجه به درجه اهمیت هرکدام از اجزا نسبت به انتخاب پارامترها اقدام می‌نماید. این نتیجه هم‌راستا با تحقیقات هه و همکاران (He et al., 2019) و همچنین مورالز و همکاران (Morales et al., 2019) می‌باشد. درجایی دیگر این تحقیق با تحقیقات فیروزی و همکاران (Firouzi et al., 2019)، سونگ و همکاران (Song et al., 2014) و همچنین شائو (Shao, 2018) هم‌راستاست و نتایج مشابهی را دنبال می‌کنند. به‌عنوان تحقیقات آتی پیشنهاد می‌شود تا بسط مدل ارائه‌شده در حوزه‌های زیر صورت پذیرد: با توجه به اختلالات، اهمیت مدیریت ریسک در زنجیره تأمین دوچندان شده است. توسعه راهکارهای نوین برای شناسایی، ارزیابی و کاهش ریسک‌های موجود ضرورت دارد. یکی دیگر از پیشنهادها استفاده از تکنیک‌های یادگیری ماشین و تحلیل داده‌های کلان برای بهینه‌سازی زنجیره تأمین است. پیش‌بینی تقاضا، مدیریت موجودی و انتخاب تأمین‌کنندگان می‌تواند به‌طورهوشمند در نظر گرفته شود. مطالعه بر روی الگوهای زنجیره تأمین و توزیع نوین مانند تأمین به‌موقع که می‌تواند در بهینه‌سازی موجودی و کاهش هزینه‌ها مؤثر باشد.

٤- منابع

Amin-Tahmasbi, H., Raheb, M., & Jafariyeh, S. (2018). A green optimization model in closed-loop supply chain with the aim of increasing profit and reducing environmental problems, with regard to product guaranty period. *Journal of operational research in its applications (applied mathematics)-Lahijan Azad University*, 15(3), 27-44.

Beheshtinia, M. A., & Nemati-Abozar, V. (2017). A Combination of Fuzzy AHP and TOPSIS Method for the Supplier Selection Problem (Case Study: Advertising Company). *Journal of Modeling in Engineering*, *15*(48), 217-229.

Bertsimas, D., & Sim, M. (2004). The price of robustness. Operations research, 52(1), 35-53.

Dickson, G. W. (1966). An analysis of vendor selection systems and decisions. *Journal of purchasing*, *2*(1), 5-17.

Fallah, P., Rabiee, M., Yousefi-Babadi, A., Roghanian, E., & Hajiaghaei-Keshteli, M. (2023). Designing an Agile, flexible and resilient disaster supply chain network using a hybrid group decision-making robust optimization framework. *Computers & Industrial Engineering*, *184*, 109591.

Firouzi, F., Baglieri, E., & Jaber, M. Y. (2014). Two-product inventory management with fixed costs and supply uncertainty. *Applied Mathematical Modelling*, *38*(23), 5635-5650.

Gaballa, A. A. (1974). Minimum cost allocation of tenders. *Journal of the Operational Research Society*, *25*(3), 389-398.

He, J., Alavifard, F., Ivanov, D., & Jahani, H. (2019). A real-option approach to mitigate disruption risk in the supply chain. *Omega*, *88*, 133-149.

Ivanov, D., & Dolgui, A. (2020). Viability of intertwined supply networks: extending the supply chain resilience angles towards survivability. A position paper motivated by COVID-19 outbreak. *International journal of production research*, *58*(10), 2904-2915.

Jabbarzadeh, A., Fahimnia, B., Sheu, J. B., & Moghadam, H. S. (2016). Designing a supply chain resilient to major disruptions and supply/demand interruptions. *Transportation Research Part B: Methodological*, *94*, 121-149.

Jabbarzadeh, A., Jalali Naini, S. G., Davoudpour, H., & Azad, N. (2012). Designing a supply chain network under the risk of disruptions. *Mathematical Problems in Engineering*, *2012*(1), 234324.

Kim, J., Qiu, R., Jon, J., & Sun, M. (2024). Multi-objective programming for multi-period multi-product closed-loop supply chain network design: a fuzzy robust optimization approach. *Environment, Development and Sustainability*, 1-37.

Leung, S. C., & Wu, Y. (2004). A robust optimization model for stochastic aggregate production planning. *Production planning & control*, *15*(5), 502-514.

Leung, S. C., Tsang, S. O., Ng, W. L., & Wu, Y. (2007). A robust optimization model for multi-site production planning problem in an uncertain environment. *European journal of operational research*, *181*(1), 224-238.

Malcolm, S. A., & Zenios, S. A. (1994). Robust optimization for power systems capacity expansion under uncertainty. *Journal of the operational research society*, *45*(9), 1040-1049.

Markowitz, H. M. (1976). Markowitz revisited. *Financial Analysts Journal*, *32*(5), 47-52.

Morales, F., Franco, C., & Mendez-Giraldo, G. (2018). Dynamic inventory routing problem: Policies considering network disruptions. *International Journal of Industrial Engineering Computations*, *9*(4), 523-534.

Pishvaee, M. S., & Torabi, S. A. (2010). A possibilistic programming approach for closed-loop supply chain network design under uncertainty. *Fuzzy sets and systems*, 161(20), 2668-2683.

Prakash, S., Kumar, S., Soni, G., Jain, V., & Rathore, A. P. S. (2020). Closed-loop supply chain network design and modelling under risks and demand uncertainty: an integrated robust optimization approach. *Annals of operations research*, *290*, 837-864.

Rahimimanesh, A., Amin-Tahmasbi, H., & shahroodi, K. (2020). Providing a mathematical optimization model for the multi-product supply chain despite the possibility of supplier disruption under sanctions (Case Study of Refinery Repair Industries). *Journal of Modeling in Engineering*, 18(60), 107-125.

Sadeghi, Z., Boyer, O., Sharifzadeh, S., & Saeidi, N. (2021). A robust mathematical model for sustainable and resilient supply chain network design: preparing a supply chain to deal with disruptions. *Complexity*, *2021*(1), 9975071.

Safari, L., Sadjadi, S. J., & Sobhani, F. M. (2023). Resilient and sustainable supply chain design and planning under supply disruption risk using a multi-objective scenario-based robust optimization model. *Environment, Development and Sustainability*, 1-43.

Sargut, F. Z., & Qi, L. (2012). Analysis of a two-party supply chain with random disruptions. *Operations Research Letters*, *40*(2), 114-122.

Sawik, T. (2011). Selection of supply portfolio under disruption risks. Omega, 39(2), 194-208.

Schmitt, A. J., & Singh, M. (2009, December). Quantifying supply chain disruption risk using Monte Carlo and discrete-event simulation. In *Proceedings of the 2009 winter simulation conference (WSC)* (pp. 1237-1248). IEEE.

Schmitt, A. J., & Singh, M. (2012). A quantitative analysis of disruption risk in a multi-echelon supply chain. *International journal of production economics*, *139*(1), 22-32.

Shao, X. F. (2018). Production disruption, compensation, and transshipment policies. *Omega*, *74*, 37-49.

Snyder, L. V., & Daskin, M. S. (2006). Stochastic p-robust location problems. *Iie Transactions*, *38*(11), 971-985.

Song, D. P., Dong, J. X., & Xu, J. (2014). Integrated inventory management and supplier base reduction in a supply chain with multiple uncertainties. *European Journal of Operational Research*, *232*(3), 522-536.

Tang, C. S. (2006). Perspectives in supply chain risk management. *International journal of production economics*, *103*(2), 451-488.

Tomlin, B. (2009). Impact of supply learning when suppliers are unreliable. *Manufacturing & Service Operations Management*, *11*(2), 192-209.

Torabi, S. A., Baghersad, M., & Mansouri, S. A. (2015). Resilient supplier selection and order allocation under operational and disruption risks. *Transportation research part e: logistics and transportation review*, *79*, 22-48.

Verweij, B., Ahmed, S., Kleywegt, A. J., Nemhauser, G., & Shapiro, A. (2003). The sample average approximation method applied to stochastic routing problems: a computational study. *Computational optimization and applications*, *24*, 289-333.

W. O. (WHO). (2002). Gender and health in disasters Geneva: World Health Organization.

Weber, C. A., Current, J. R., & Benton, W. C. (1991). Vendor selection criteria and methods. *European journal of operational research*, *50*(1), 2-18.

Yao, M., & Minner, S. (2017). Review of multi-supplier inventory models in supply chain management: An update. *Available at SSRN*, *2995134*.

Yu, C. S., & Li, H. L. (2000). A robust optimization model for stochastic logistic problems. *International journal of production economics*, *64*(1-3), 385-397.

Zarrat Dakhely Parast, Z., Haleh, H., Avakh Darestani, S., & Amin-Tahmasbi, H. (2021). Green reverse supply chain network design considering location-routing-inventory decisions with simultaneous pickup and delivery. *Environmental Science and Pollution Research*, 1-22.

Zhen, L., Wang, K., & Liu, H. C. (2014). Disaster relief facility network design in metropolises. *IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics: Systems*, *45*(5), 751-761.

Zokaee, S., Bozorgi-Amiri, A., & Sadjadi, S. J. (2016). A robust optimization model for humanitarian relief chain design under uncertainty. *Applied mathematical modelling*, *40*(17-18), 7996-8016.

Designing a Multi-Product Supply Chain Model Despite Disruption in the Supplier With A Stable Mathematical Optimization Approach in Refinery Maintenance Industries

Amir Rahimimanesh
PhD Candidate in Industrial Management, Faculty of Management and Accounting, Rasht Branch, Islamic Azad University, Rasht, Iran
Hamzeh Amin-Tahmasbi (Corresponding Author)
Associate Professor, Department of Industrial Engineering, East Faculty of Technology and Engineering, Gilan University, Rudsar, Iran
Email: amintahmasbi@guilan.ac.ir
Kambiz Shahroudi
Associate Professor, Faculty of Management and Accounting, Rasht Branch, Islamic Azad University, Rasht, Iran

Abstract
The supply chain network design problem includes strategic decisions that significantly impact tactical and operational configurations and decisions. The purpose of this research is to provide a multi-product supply chain model that addresses supplier disruptions through a mathematical optimization approach. In line with multi-product supply chain management, there is a need to supply items and raw materials for use in processes, and the supply of these items is subject to uncertainty. Specifically, suppliers may not provide part of the ordered demand to the customer at the required time. To address this uncertainty, two types of suppliers are considered. The first category consists of cheap but unreliable suppliers, while the second category includes reliable suppliers who are more expensive than the first. Items received from suppliers are used in the production or repair process, and a documented model should be provided to manage this process. To integrate these decisions into a cohesive model, previous articles have utilized a random two-stage decision-making model, employing the sampling average approximation method to solve the proposed problem. In this research, due to the dependence of the random two-stage model on non-deterministic parameters (or the worst-case scenario), a robust mathematical model has been developed for the two-stage random model. Finally, the stable model provides the decision-maker with the opportunity to choose the parameters according to the degree of importance of each component.
Keywords: Supply Chain, Robust Mathematical Optimization, Disturbance, Random Two-Stage Model.