

طراحی چندهدفه زنجیره تأمین با در نظر گرفتن ریسک اختلال تسهیلات، عرضه و تقاضا در شرایط غیر قطعی بودن پارامترهای اقتصادی

مسعود ربانی،* ندا معنوی زاده،** امیر فرشباف گرانیماه***

(تاریخ دریافت: ۹۳/۲/۱۳ - تاریخ پذیرش: ۹۴/۱/۲۴)

چکیده

در این مقاله، مسأله‌ی طراحی شبکه زنجیره تأمین به صورت برنامه‌ریزی ریاضی عدد صحیح مختلط فازی چندهدفه مدلسازی شده است که اهداف آن را بیشینه‌سازی ارزش خالص فعلی درآمد، کمینه‌سازی تأخیر دریافت محصول توسط مشتری و همچنین بیشینه‌سازی قابلیت اطمینان تأمین‌کننده‌ها با در نظر گرفتن ریسک تقاضا، عرضه و اختلال تشکیل می‌دهند که از رویکرد برنامه‌ریزی امکانی تعاملی برای حل مدل ریاضی چندهدفه استفاده شده است. جهت اطمینان یافتن از سطح بالای عملکرد زنجیره تأمین در صورت رخداد اختلال، شاخص استواری با استفاده از رویکرد مدلسازی مبتنی بر سناریوها، بکار گرفته شده است. همچنین به دلیل کمبود اطلاعات، در مدل ارائه شده برخی از پارامترهای اقتصادی همچون نرخ مالیات و نرخ تورم به صورت فازی در نظر گرفته شده‌اند. به دلیل پیچیدگی مدل ارائه شده، از الگوریتم ژنتیک برای حل مسائل با ابعاد بزرگ استفاده شده است. در پایان، عملکرد و کارایی مدل و روش پیشنهادی در قالب مثال‌های عددی مورد بررسی قرار می‌گیرند.

کلمات کلیدی:

طراحی زنجیره تأمین، برنامه‌ریزی عدد صحیح مختلط چندهدفه، برنامه‌ریزی امکانی، جریان نقدی، روش TH، الگوریتم ژنتیک.

* استاد دانشکده مهندسی صنایع و سیستم‌ها، دانشکده فنی، دانشگاه تهران (نویسنده مسئول): mrabani@ut.ac.ir

** استادیار گروه مهندسی صنایع دانشگاه الزهراء

*** دانشجوی دکتری دانشکده مهندسی صنایع و سیستم‌ها، دانشکده فنی، دانشگاه تهران

مقدمه و مرور ادبیات

در طول سالیان اخیر شرکت‌ها با توسعه بازارها و افزایش انتظارات مشتریان مواجه شده‌اند که آنها را ملزم به پیاده‌سازی بسیاری از فناوری‌ها و روش‌های مدیریتی پیشرفته مانند تولید ناب، تجارت جهانی، برون‌سپاری و مدیریت متمرکز کرده است. این فناوری‌ها و روش‌ها باعث ایجاد ارتباطات درونی گسترده و پیچیده‌ای میان تأمین‌کنندگان، تولیدکنندگان و فروشندگان در خصوص مواد اولیه، اطلاعات و جریانهای مالی شده و در مجموع شبکه‌های زنجیره تأمین پیچیده‌ای را بوجود آورده است. با توجه به موارد بالا، مفهوم مدیریت زنجیره تأمین (SCM) به میان آمد. مدیریت زنجیره تأمین عبارت است از کنترل جریان مواد میان تأمین‌کنندگان، کارخانجات، انبارها و مشتریان به طور کارآمد صورتی که هزینه کل را کمینه نماید (Torabi & Hassini, 2008). یکی از مهمترین مسائل در مدیریت زنجیره تأمین عبارت است از درک دقیق اینکه چگونه و کجا از دارایی‌های خود برای کارکرد بهینه مالی و عملیاتی بهره برداری کنیم. این مسأله در طراحی شبکه زنجیره تأمین مورد مطالعه قرار گرفته است. طراحی شبکه زنجیره تأمین شامل پیکربندی شبکه مربوط به سمت تأمین‌کننده، تولیدکننده و مشتری است که همزمان با تأمین تقاضای مشتریان در زمان‌های مختلف، به صرفه‌ترین برنامه‌های عملیاتی را نیز مشخص می‌کند (Lin & Wang, 2011). محققان حوزه طراحی زنجیره تأمین بایستی اهداف کسب و کار، محدودیتهای منابع و اثرات مالی متعاقب را بمنظور تعریف یک ساختار بهینه برای زنجیره تأمین تأمین‌کننده-مشتری بطوریکه هزینه‌ها را کاهش داده و سودآوری را افزایش دهد، در نظر بگیرد.

تلاش‌های بسیاری برای مطالعه مسأله طراحی شبکه زنجیره تأمین انجام شده است. نیکل و همکاران (Nickel, Saldanha-da-Gama, & Ziegler, 2012) یک مسأله طراحی شبکه زنجیره تأمین چند دوره‌ای را ارائه کرده‌اند که در آن ویژگی‌های عملی متعددی مانند موارد مرتبط با تصمیمات مالی که باید توسط شرکت مدیریت‌کننده زنجیره تأمین در نظر گرفته شوند، مطالعه و بررسی شده‌اند. این تصمیمات شامل مکان‌یابی تسهیلات، جریان مواد

و سرمایه‌گذاری به منظور ایجاد فعالیت‌های جایگزین برای فعالیت‌های مرتبط با طراحی زنجیره تامین می‌باشد. عدم قطعیت در تقاضا و نرخ بهره توسط مجموعه‌ای از سناریوها تعریف و در نظر گرفته شده‌اند. همچنین شاخصی به نام سطح خدمت نیز اندازه‌گیری و در تابع هدف گنجانده شده است.

تکنیک‌های گوناگونی در مدل‌سازی مسأله طراحی شبکه زنجیره تامین به کار رفته‌اند. ناگورنی^۱ (۲۰۱۰) برای مسائل طراحی شبکه زنجیره تامین رقابتی از مدل‌سازی مبتنی بر تئوری بازی‌ها استفاده کرده‌اند. رضاپور و فراهانی (۲۰۱۰) برای طراحی شبکه زنجیره تامین متمرکز در شرایط تقاضای قطعی وابسته به قیمت و با حضور یک زنجیره تامین رقیب یک مدل تعادلی ارائه کرده‌اند. دو زنجیره در مدل آنها در نظر گرفته شده که محصولات رقابتی را برای بازارهای فروشنده موجود تامین می‌کنند. جورجیادیس و همکاران^۲ (۲۰۱۱) مدلی شامل تولیدکنندگان با قابلیت تولید چندین محصول با منابع تولید مشترک، انبارها، مراکز توزیع، مشتریان و عدم قطعیت در تقاضا برای طراحی شبکه زنجیره تامین ارائه کرده‌اند. همچنین در مدل آنها عدم قطعیت به صورت تعریف مجموعه سناریوهای ممکن در افق برنامه ریزی در نظر گرفته شده است.

مطالعات بسیاری در زمینه طراحی زنجیره تامین صورت گرفته است. لیکن عدم قطعیت در عرضه و تقاضا و دیگر ریسک‌های موجود در زنجیره تامین و همچنین معیارهایی از قبیل رضایت مشتریان، پاسخگویی مناسب، تولید ناب و تولید چابک زنجیره تامین را پیچیده و دشوار می‌سازد. تمامی موارد مذکور آسیب‌پذیری زنجیره تامین را افزایش داده و می‌بایست در تصمیم‌گیری در نظر گرفته شوند (Qin, 2011).

ریسک زنجیره تامین را می‌توان به صورت وقوع بالقوه یک رخداد یا عدم موفقیت در استفاده از فرصت‌ها که موجب زیان‌های مالی برای شرکت می‌شود (Zsidisin & Ritchie, 2008) و یا به صورت هر ریسکی در اطلاعات، جریان مواد و تولید از تامین مواد اولیه تا تحویل

1- Nagurney

2- Georgiadis et al.

محصول نهایی به مشتری (Gaudenzi & Borghesi, 2006) تعریف کرد. از آنجا که افراد تعاریف مختلفی از اینکه چه مواردی ریسک محسوب می‌شوند دارند، هیچ تعریف روشن و دقیقی برای ریسک وجود ندارد. در حوزه زنجیره تأمین، ریسک را می‌توان به دو گروه ریسک‌های داخلی مانند ریسک تولید و توزیع، ریسک تقاضا، ریسک عرضه و غیره، و ریسک‌های خارجی مانند اختلال (بلایای طبیعی، حملات تروریستی)، عدم قطعیت پارامترهای اقتصادی (نوسانات نرخ مبادله ارز و غیره) دسته‌بندی کرد. از آنجا که چشم پوشی از این ریسک‌ها بر عملکرد زنجیره تأمین تأثیر منفی می‌گذارد، بایستی هر دو ریسک داخلی و خارجی در طراحی زنجیره تأمین در نظر گرفته شود (Singh, Mishra, Jain, & Khurana, 2012). از اینرو، در این بخش از مرور ادبیات به مرور مطالعات صورت گرفته در خصوص در نظر گرفتن هر دو نوع از ریسک (داخلی و خارجی به صورت مجزا) در طراحی زنجیره تأمین می‌پردازیم.

ریسک‌های داخلی در طراحی زنجیره تأمین

حیاتی و همکاران (۱۳۹۳) مدل سلسله مراتبی برای ارزیابی ریسک‌های زنجیره تأمین ارائه نمودند. آن‌ها با تهیه پرسشنامه و استفاده از تکنیک‌های چندشاخصه به ارزیابی و رتبه‌بندی ریسک‌های زنجیره تأمین فولاد در شرکت ذوب آهن اصفهان پرداختند. سینگ و همکاران (۲۰۱۲)^۱ مدلی برای شبکه زنجیره تأمین چند سطحی با در نظر گرفتن ریسک‌های مربوط به نرخ مبادله، دیرکرد در تحویل سفارش، مشکلات مربوط به کیفیت، خرابی سیستم حمل و نقل و ریسک تولید ارائه کرده‌اند. سپس مسأله مورد نظر را به صورت یک مدل بهینه‌سازی با هدف حداقل کردن ارزش فعلی خالص هزینه‌ها مدل‌سازی ریاضی کرده‌اند.

میرغفوری و همکاران (۱۳۹۳) ریسک‌های مربوط به تأمین کنندگان را در یک مطالعه موردی بررسی نمودند. آن‌ها از تکنیک دلفی فازی برای شناسایی عوامل موثر بر ریسک تأمین

1- Singh et al.

کنندگان استفاده کرده و با استفاده از ترکیب تکنیک‌های AHP-ویکور و بکارگیری شبکه عصبی مصنوعی ریسک وارد شده از هر تأمین کننده را پیش‌بینی نمودند. گوادنزی و بورغسی^۱ (۲۰۰۶) ریسک‌های داخلی شبکه زنجیره تأمین را در نظر گرفته‌اند و از روش AHP برای تعیین شاخص‌ها و معیارهای اندازه‌گیری ریسک در زنجیره تأمین به منظور ارزیابی ریسک-های زنجیره تأمین و بهبود رضایت مشتری استفاده کرده‌اند. از جمله پژوهش‌های دیگری که به تجزیه و تحلیل ریسک در زنجیره تأمین پراخته‌اند می‌توان به مطالعه وو و همکاران^۲ (۲۰۰۶) اشاره نمود. آنها چارچوبی برای مدیریت ریسک زنجیره تأمین ارائه کرده‌اند که در آن روش مقایسه زوجی با استفاده از روش AHP بمنظور کمک به ارزیابی ریسک زنجیره تأمین بکار رفته است. ایجاد این چارچوب براساس ریسک‌هایی است که با استفاده از مرور ادبیات و مصاحبه با صاحبان صنایع جمع‌آوری شده‌اند.

یکی دیگر از ریسک‌های داخلی در طراحی شبکه زنجیره تأمین عدم قطعیت در عرضه و تقاضا است. هان و کان^۳ (۲۰۱۲) مدلی از عملکرد یکپارچه مبتنی بر ارزش و مدیریت ریسک عملیاتی برای برنامه‌ریزی میان مدت زنجیره تأمین ارائه کرده‌اند. آنها یک زنجیره تأمین از ساخت تا انبارش با تولید یک مرحله‌ای را در نظر گرفتند که در آن تقاضا غیرقطعی و ظرفیت تولید محدود بوده و به طور همزمان جریان مواد و اطلاعات در برنامه‌ریزی عملیات فروش را بر حسب ارزش اقتصادی با استفاده از روش بهینه‌سازی استوار، بهینه می‌کند. یک مدل احتمالی چند مرحله‌ای برای شبکه‌های جهانی زنجیره تأمین توسط گوه و همکاران^۴ (۲۰۰۷) ارائه شده است که شامل برخی از ریسک‌های مرتبط مانند ریسک‌های عرضه، تقاضا، نرخ مبادله و اختلال می‌باشد. آنها مسأله مکان‌یابی تسهیلات بین‌المللی و برنامه‌ریزی لجستیک توزیع را در داخل شبکه زنجیره تأمین جهانی در نظر گرفته و فرض کرده‌اند که شرکت تنها یک نوع محصول تولید می‌کند. همچنین تفاوت نرخ مالیات در کشورهای مختلف نیز در نظر

1- Gaudenzi and Borghesi

2- Wu et al.

3- Hahn and Kuhn

4- Goh et al.

گرفته شده است. آذرون و همکاران^۱ (۲۰۰۸) یک رویکرد برنامه ریزی احتمالی استوار برای طراحی زنجیره تأمین تحت شرایط عدم قطعیت توسعه داده اند. آنها فرض کرده اند که تأمین کنندگان قابل اطمینان نبوده و ممکن است نتوانند عملیات عرضه را بطور کامل انجام دهند. در این مطالعه قابلیت اطمینان تأمین کنندگان قطعی فرض شده است. ونکاتسان و کومانان^۲ (۲۰۱۲) از یک رویکرد چندهدفه به منظور یافتن استراتژی یافتن منبع مناسب و ارزیابی اولویت تأمین کنندگان محلی با قابلیت اطمینان و هزینه بالا در مقایسه با تأمین کنندگان خارجی با قابلیت اطمینان و هزینه کمتر برای یک کارخانه متوسط تولید کننده اثاثیه پلاستیکی و لوازم خانگی استفاده کرده اند. این مسأله به صورت یک مدل برنامه ریزی عدد صحیح مختلط چند دوره‌ای که به دنبال حداقل کردن هزینه کل و حداکثر کردن قابلیت اطمینان در تحویل تقاضا می-باشد، مدل‌سازی شده است. بن‌یوسف و همکاران^۳ (۲۰۱۳) نیز رویکردی مبتنی بر لاگرانژ برای طراحی زنجیره تأمین با در نظر گرفتن قابلیت اطمینان تأمین کنندگان ارائه نمودند. در این پژوهش، در مورد مکان‌یابی مراکز توزیع، تخصیص تأمین کنندگان به مراکز توزیع و تخصیص خرده‌فروشان به مراکز توزیع باتوجه به قابلیت اطمینان تأمین کنندگان تصمیم‌گیری شده است. گوموس و همکاران^۴ (۲۰۰۹) مدل طراحی شبکه زنجیره تأمین سه سطحی یکپارچه تحت شرایط عدم قطعیت تقاضا ارائه کرده اند که در آن رویکردهای عصبی-فازی یکپارچه و برنامه ریزی خطی عدد صحیح مختلط به منظور تعریف مسأله به کار رفته‌اند.

ریسک‌های خارجی زنجیره تأمین

یکی از ریسک‌های خارجی مهم در زنجیره تأمین ریسک اختلال است. مکانیابی قابل اعتماد در شرایط بروز اختلال یکی از موضوعاتی است که در سال‌های اخیر مورد توجه پژوهشگران قرار گرفته است (Farahani et al., 2014; Li et al., 2013). پنگ و همکاران^۵

1- Azaron et al.

2- Venkatesan and Kumanan

3- Benyoucef et al.

4 - Gumus et al.

5 - Peng et al.

(۲۰۱۱) مسأله طراحی شبکه زنجیره تامین شامل گره‌های تامین، انتقال و تقاضا (زنجیره تامین دوسطحی) را با در نظر گرفتن اختلال تسهیلات مانند اختلال گره انتقال کالا مطالعه کرده‌اند. آنها مسأله مورد نظر را به صورت یک مدل برنامه‌ریزی عدد صحیح مختلط (که شامل شاخص استواری در محدودیت‌ها است) به منظور حداقل کردن مجموع هزینه‌ها شامل هزینه حمل و نقل و هزینه ثابت مکان‌یابی با در نظر گرفتن اختلال در سناریوهای مختلف، برنامه‌ریزی ریاضی کرده‌اند. در پژوهش حاضر نیز از رویکرد پنگ و همکاران برای مدل‌سازی ریسک اختلال در زنجیره تامین با استفاده از تعریف شاخص استواری بهره گرفته شده است. طراحی زنجیره تامین چهارسطحی، در نظر گرفتن ریسک‌های داخلی و همچنین ریسک عدم قطعیت پارامترهای اقتصادی و استفاده از شاخص استواری در مسأله چندهدفه را می‌توان به عنوان برخی از نوآوری‌های پژوهش حاضر نسبت به مطالعه پنگ و همکاران عنوان نمود.

اسپیر و همکاران^۱ (۲۰۱۱) چارچوبی برای بررسی تهدیدات ناشی از اختلالات بالقوه در فرایندهای زنجیره تامین توسعه داده و بر روی کاهش احتمال این تهدیدها و استراتژی‌های قابل استفاده در طراحی زنجیره تامین بمنظور کاهش ریسک متمرکز شدند. همچنین رویکردی شامل چند روش بمنظور شناسایی اقدامات اولیه کلیدی و قابل پیاده‌سازی مربوط به ایمنی و حفاظت (مدیریت فرایند، به اشتراک گذاری اطلاعات و مدیریت ارتباط شریک زنجیره تامین و ارائه کننده خدمت) و شناسایی بهترین شرایط برای بکارگیری هر اقدام، استفاده شده است. تونکل و آلپان^۲ (۲۰۱۰) نشان دادند که چگونه می‌توان شبکه‌های پتری را برای مدل‌سازی و آنالیز شبکه زنجیره تامین که ریسک‌های گوناگونی متوجه آن است بکار برد. آنها عوامل اختلال شبکه زنجیره تامین را با استفاده از تکنیک تجزیه و تحلیل حالت، اثرات و حساسیت خرابی (FMECA)^۳ بررسی کرده‌اند. سپس مدیریت ریسک را بوسیله شبیه‌سازی مبتنی بر شبکه پتری با فرآیند طراحی، برنامه‌ریزی و ارزیابی شبکه‌های زنجیره تامین ادغام کرده‌اند.

1- Speier et al.

2- Tuncel and Alpan

3 - Failure mode, effects and criticality analysis

لیو و کروز^۱ (۲۰۱۲) اهمیت عدم قطعیت پارامترهای مالی در شبکه زنجیره تأمین را بررسی کرده‌اند و مدلی ارائه کرده‌اند که در آن تجزیه و تحلیل‌های توازن شبکه بمنظور مدل‌سازی روابط تجاری میان شرکت‌ها در شبکه زنجیره تأمین با توجه به ریسک‌های مالی و ارزش شرکت‌های مرتبط در شبکه زنجیره تأمین، ترکیب شده‌اند.

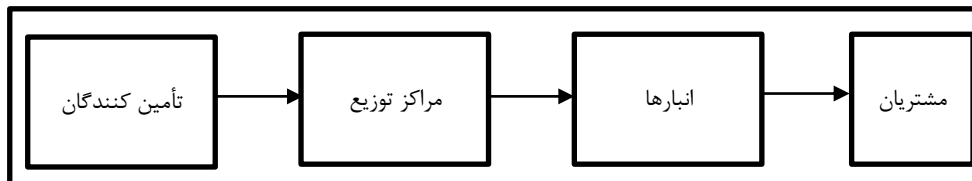
باتوجه به مرور ادبیات صورت گرفته، برای تصمیم‌گیری صحیح برای طراحی زنجیره تأمین ریسک‌های مختلف داخلی (همچون ریسک عدم قطعیت تقاضا) و ریسک‌های خارجی (مانند ریسک اختلال و عدک قطعیت پارامترهای اقتصادی) بایستی مدنظر قرار گیرند. ادبیات موضوع نشان‌دهنده این موضوع است که مطالعات چندانی که تمامی موارد فوق را در طراحی زنجیره تأمین مدنظر قرار دهد، وجود ندارد. از سوی دیگر، بهینه‌سازی همزمان اهدافی همچون بیشینه‌سازی درآمد با در نظرگیری ارزش زمانی پول، کمینه‌سازی تأخیر در تحویل محصول به مشتری و بیشینه‌سازی قابلیت اطمینان ارضای تقاضای مشتری باتوجه به قابلیت اطمینان تأمین‌کنندگان از جمله سایر نوآوری‌های موجود در این پژوهش می‌باشد.

ساختار این مطالعه در ادامه به این گونه است که در بخش دوم به تشریح مسأله، مفروضات و مدل ریاضی فازی چندهدفه ارائه شده، پرداخته می‌گردد. نحوه تبدیل آن به مدل ریاضی قطعی و چگونگی بکارگیری روش TH جهت حل مدل چندهدفه و همچنین نحوه بکارگیری الگوریتم ژنتیک در بخش سوم توضیح داده شده و در بخش چهارم عملکرد مدل ریاضی و روش حل ارائه شده در قالب مثال‌های عددی مورد بررسی قرار می‌گیرد. در نهایت نتیجه‌گیری و پیشنهادات آتی در بخش پنجم ارائه می‌گردند.

تشریح مسأله و مدل ریاضی

در این مقاله همانطور که در شکل (۱) نشان داده شده مسأله طراحی شبکه زنجیره تأمین شامل تأمین‌کنندگان، کارخانه‌ها، مراکز توزیع (DC)، انبارها و مشتریان مورد مطالعه قرار گرفته

است. این مسأله عبارت است از انتخاب مکان کارخانه‌ها و مراکز توزیع از میان کاندیداهای موجود و تعیین مقدار مواد و محصولات که باید از مراحل مختلف شبکه زنجیره تامین با در نظر گرفتن ریسک اختلال، ریسک عرضه و ریسک تقاضا منتقل شوند.



شکل (۱): شبکه زنجیره تامین

ریسک‌های اختلال (مانند بلایای طبیعی، حملات تروریستی، اختلال در کارخانه‌ها و غیره) ممکن است در کارخانه‌ها، مراکز توزیع و انبارها رخ دهند. در این مقاله جهت استواری مدل با در نظر گرفتن وقوع سناریوهای مختلف اختلال، از شاخص استواری استفاده می‌شود. به منظور حداقل کردن ریسک عرضه همانند مطالعه ونکاتسان و کومانان^۱ (۲۰۱۲)، شاخص قابلیت اطمینان برای هر تأمین کننده تعریف شده و هدف بیشینه نمودن قابلیت اطمینان تأمین کننده می‌باشد. عدم قطعیت تقاضا که ناشی از نوسانات بازار است نیز در مدل ارائه شده در این مقاله در نظر گرفته شده است.

عوامل اقتصادی مانند نرخ مالیات و نرخ تورم بعنوان عوامل غیرقطعی در این مدل در نظر گرفته شده‌اند. اطلاعات ناقص در مورد ارزش آتی این پارامترها باعث شده تا از تئوری فازی استفاده کنیم. هدف این مدل مکان‌یابی کارخانه‌ها، مراکز توزیع و انبارها و همچنین تعیین جریان مواد در شبکه است به طوری که بیشینه ارزش فعلی درآمد، حداقل تأخیر تحویل محصول و حداکثر قابلیت اطمینان تأمین کنندگان در مدل برنامه‌ریزی خطی عدد صحیح مختلط در فضای فازی بدست آیند.

مفروضات

- براساس مطالب بیان شده، مفروضات اصلی مدل بشرح زیر می‌باشند:
۱. به دلیل غیر قطعی بودن تقاضای محصولات نهایی که ناشی از نوسانات بازار است، تقاضا و همچنین زمان تحویل مورد انتظار بصورت فازی در نظر گرفته شده‌اند.
 ۲. جهت اطمینان از تأمین مواد در زنجیره، شاخص قابلیت اطمینان برای هر یک از تأمین کنندگان تعریف شده است.
 ۳. جهت در نظر گرفتن رضایت مشتری، کمینه کردن تأخیر تحویل محصول نهایی بعنوان یکی از توابع هدف در نظر گرفته شده است.
 ۴. جهت اطمینان یافتن از سطح بالای عملکرد زنجیره تأمین در صورت رخداد اختلال، شاخص استواری با استفاده از رویکرد مدلسازی مبتنی بر سناریوها، بکار گرفته شده است.
 ۵. محدودیتهای ظرفیت کارخانجات، مراکز توزیع و انبارها در نظر گرفته شده‌اند.
 ۶. درآمد حاصل از مالیات در مدل ارائه شده لحاظ شده است، که در آن نرخ مالیات بدلیل عدم قطعیت ناشی از عواملی مانند سیاست‌های پولی دولت فازی در نظر گرفته شده است. همچنین نرخ تورم به دلیل عدم قطعیت ناشی از شرایط اقتصادی جهانی و سیاست‌های دولت فازی در نظر گرفته شده است.
 ۷. هر فروشنده می‌تواند توسط تمامی انبارها و هر انبار می‌تواند توسط تمامی مراکز توزیع خدمت‌دهی شود.

اندیس‌ها

s	تأمین کننده	m	انبار	p	محصول
k	کارخانه	n	مشتری	j	مواد
l	مرکز توزیع	t	دوره	τ	اندازه تأسیسات (کوچک، متوسط، بزرگ)

ω سناریو

پارامترها

\tilde{g}_{jskt} هزینه حمل و نقل هر واحد مواد j از تأمین کننده s به کارخانه k در دوره t

\tilde{g}_{pkt} هزینه حمل و نقل هر واحد محصول p از کارخانه k به مرکز توزیع l

\tilde{g}_{plmt} هزینه حمل و نقل هر واحد محصول p از مرکز توزیع l به انبار m

\tilde{g}_{pmt} هزینه حمل و نقل هر واحد محصول p از انبار m به فروشنده n

$f_{k\tau}$ هزینه ثابت افتتاح کارخانه k با اندازه $v_{k\tau}$ هزینه متغیر افتتاح/عملیات کارخانه k با اندازه τ

$f_{l\tau}$ هزینه ثابت افتتاح مرکز توزیع l با $v_{l\tau}$ هزینه متغیر افتتاح/عملیات مرکز توزیع l با اندازه τ

$f_{m\tau}$ هزینه ثابت افتتاح انبار m با اندازه $v_{m\tau}$ هزینه متغیر افتتاح/عملیات انبار m با اندازه τ

\tilde{tr}_{jskt} نرخ مالیات در $ij\tilde{}$ نرخ تورم؛ \tilde{i} نرخ بهره دوره t

$h_{k\tau}$ ظرفیت کارخانه k با $h_{l\tau}$ ظرفیت مرکز توزیع l با $h_{m\tau}$ ظرفیت انبار m با اندازه τ

\tilde{d}_{pnt} تقاضای مشتری n برای محصول p γ_p ظرفیت مورد نیاز برای هر واحد محصول p در دوره t در کارخانه

α_p ظرفیت مورد نیاز برای هر واحد محصول p در مرکز توزیع

β_p ظرفیت مورد نیاز برای هر واحد محصول p در انبار

δ_{pj} مقدار مصرف مواد j برای تولید محصول p

\tilde{w}_{jst} هزینه خرید هر واحد مواد j از تأمین کننده s در دوره t

$\tilde{\lambda}_{pkt}$ هزینه تولید محصول p در کارخانه k در دوره t

\tilde{r}_{plt} هزینه عملیات هر واحد محصول p در مرکز توزیع l در دوره t

\tilde{r}_{pmt} هزینه عملیات هر واحد محصول p در انبار m در دوره t

\tilde{E}_{pmnt} قیمت محصول p فروخته شده از انبار m به مشتری n در دوره t
 φ سطح استواری مطلوب

R_s شاخص قابلیت اطمینان تأمین کننده s در تحویل کالا

dt_{pmnt} زمان تحویل انبار m به مشتری n از محصول p در دوره t ام

edt_{pnt} زمان تحویل مورد انتظار مشتری n از محصول p در دوره t ام

$M_{pnt} = \{m \mid dt_{pmnt} \geq edt_{pnt}\}$ مجموعه انبارهایی که در دوره t ام، زمان تحویل محصول p ام به مشتری n ام بیشتر از زمان مورد انتظار برای تحویل آن مشتری برای آن محصول و در آن دوره باشد.

a_{ok} یک است اگر k امین کارخانه در سناریوی ω ام دچار اختلال شود.

b_{ol} یک است اگر l امین مرکز توزیع در سناریوی ω ام دچار اختلال شود.

c_{om} یک است اگر m امین انبار در سناریوی ω ام دچار اختلال شود.

متغیرهای تصمیم

$x_{jst\omega}$ مقدار مواد j تحویل داده شده از تأمین کننده s به کارخانه k در دوره t در سناریوی ω

$x_{pkt\omega}$ مقدار محصول p منتقل شده از کارخانه k به مرکز توزیع l در دوره t در سناریوی ω

$x_{plmt\omega}$ مقدار محصول p منتقل شده از مرکز توزیع l به انبار m در دوره t در سناریوی ω

$x_{pmnt\omega}$ مقدار محصول p فروخته شده از انبار m به مشتری n در دوره t در سناریوی ω

$Q_{pkt\omega}$ مقدار محصول p تولید شده در کارخانه k در دوره t در سناریوی ω

$u_{k\tau}$ یک است در صورتیکه کارخانه k با اندازه τ افتتاح شود/فعال باشد؛ در غیر اینصورت صفر.

$u_{l\tau}$ یک است در صورتیکه مرکز توزیع l با اندازه τ افتتاح شود/فعال باشد؛ در غیر اینصورت صفر.

$u_{m\tau}$ یک است در صورتیکه انبار m با اندازه τ افتتاح شود/ فعال باشد؛ در غیر اینصورت صفر.

تعریف شاخص استواری φ

شاخص استواری φ توسط اشنایدر و دسکین (Snyder & Daskin, 2006) ارائه شد و در مدل ارائه شده توسط پنگ و همکاران (Peng et al., 2011) بکار رفته است. روابط (۱) و (۲) نحوه استفاده از این شاخص را به ترتیب برای توابع هدف از نوع بیشینه سازی و کمینه سازی نشان می‌دهند که در آن G_{ω}^* مقدار بهینه تابع هدف و G_{ω} مقدار تابع هدف و $\varphi \geq 0$ شاخص استواری و ω مجموعه سناریوهای اختلال که ممکن است رخ دهند می‌باشد.

$$\frac{G_{\omega}^* - G_{\omega}}{G_{\omega}^*} \leq \varphi \quad (1)$$

$$\frac{G_{\omega} - G_{\omega}^*}{G_{\omega}^*} \leq \varphi \quad (2)$$

توابع هدف

ابتدا به بررسی توابع هدف در نظر گرفته شده برای مدل ریاضی می‌پردازیم. با توجه به شکاف تحقیقاتی موجود در ادبیات موضوع و موارد اشاره شده در بخش‌های پیشین، بیشینه‌سازی ارزش خالص فعلی جریان نقدی، کمینه‌سازی تأخیر در زمان تحویل محصول به مشتری و بیشینه‌سازی قابلیت اطمینان تحویل تقاضا به مشتریان با توجه به قابلیت اطمینان در نظر گرفته شده برای تأمین کنندگان، سه تابع هدف اصلی مدل ریاضی ارائه شده را تشکیل می‌دهند که در ادامه به بیان هر یک از آن‌ها می‌پردازیم. رابطه (۳) ارزش خالص فعلی کل جریان نقدی زنجیره تأمین در طول عمر آن را بیشینه می‌کند.

$$\text{Max } G_{1\omega} = \sum_{t=0}^T \text{Cashflow}_t \left(\frac{P}{F}, \tilde{i}_r, t \right) \quad (3)$$

که در آن Cashflow_t جریان نقدی زنجیره تأمین در زمان t ($t=0,1,\dots,T$) را نشان می‌دهد. لازم به توضیح است از پارامتر $\left(\frac{P}{F}, \tilde{i}_r, t \right) = (1 + \tilde{i}_r)^{-t}$ برای محاسبه ارزش خالص

فعلی جریان نقدی زمان t استفاده می گردد. مقدار نرخ بهره موثر (\tilde{i}_r) (که در رابطه (۳) بکار برده شده است) با توجه به نرخ بهره (\tilde{i}) و نرخ تورم (if) از طریق رابطه (۴) قابل محاسبه است. همانطور که مشاهده می گردد، به دلیل ریسک عدم قطعیت پارامترهای اقتصادی، نرخ‌های بهره موثر، نرخ بهره و نرخ تورم به صورت فازی در نظر گرفته شده‌اند.

$$\tilde{i}_r = \frac{1 + \tilde{i}}{if} - 1 \quad (۴)$$

هزینه‌های اولیه در زنجیره تأمین (جریان نقدی در زمان $t = 0$) را هزینه‌های افتتاح/ عملیات کارخانه‌ها، مراکز توزیع و انبارها تشکیل می‌دهند که در رابطه (۵) نشان داده شده است. همچنین جریان نقدی در حالت $t \neq 0$ برابر است با درآمد پس از کسر مالیات منهای هزینه کل زنجیره تأمین شامل حمل و نقل، تولید، تدارکات و هزینه‌های موجودی در دوره t که در رابطه (۶) نشان داده شده است.

$$cashflow_0 = - \left[\left(\sum_k \sum_\tau (f_{k\tau} + v_{k\tau} \cdot h_{k\tau}) \cdot u_{k\tau} \right) + \left(\sum_l \sum_\tau (f_{l\tau} + v_{l\tau} \cdot h_{l\tau}) \cdot u_{l\tau} \right) + \left(\sum_m \sum_\tau (f_{m\tau} + v_{m\tau} \cdot h_{m\tau}) \cdot u_{m\tau} \right) \right] \quad (۵)$$

$$cashflow_t = \sum_p \sum_m \sum_n (x_{pmnt\omega} \cdot \tilde{E}_{pmnt}) \cdot (1 - t\tilde{r}_t) - \sum_j \sum_s \sum_k (x_{jskt\omega} \cdot \tilde{W}_{jst}) - \sum_k \sum_p (Q_{pkt\omega} \cdot \tilde{\lambda}_{pkt}) - \sum_l \sum_p \sum_k (x_{pklt\omega} \cdot \tilde{r}_{plt}) - \sum_p \sum_m \sum_l (x_{plmt\omega} \cdot \tilde{r}_{pmt}) + \sum_j \sum_s \sum_k (x_{jskt\omega} \cdot \tilde{g}_{jst}) + \sum_p \sum_k \sum_l (x_{pklt\omega} \cdot \tilde{g}_{pklt}) + \sum_p \sum_l \sum_m (x_{plmt\omega} \cdot \tilde{g}_{plmt}) + \sum_p \sum_m \sum_n (x_{pmnt\omega} \cdot \tilde{g}_{pmnt}) \quad (۶)$$

توابع هدف دوم و سوم در نظر گرفته برای مسأله در روابط (۷) و (۸) نشان داده شده‌اند.

$$\text{Min } G_{2\omega} = \sum_t \sum_n \sum_p \sum_{m \in M_{pm}} \left(dt_{pmnt} - edt_{pmt} \right) x_{pmnt\omega} \quad (۷)$$

$$\text{Max } G_{3\omega} = \sum_t \sum_p \frac{\sum_k \sum_j \frac{\sum_s R_s x_{jskt\omega}}{\delta_{pj}}}{\sum_n d_{pnt}} \quad (۸)$$

تابع هدف دوم تأخیر در زمان تحویل به مشتری را کمینه می کند و تابع هدف سوم قابلیت اطمینان تحویل تقاضا را با توجه به قابلیت اطمینان تعریف شده برای تأمین کنندگان پیشینه می کند.

مدل ریاضی

$$\text{Max } G_{10} = \sum_{t=1}^T \text{Cashflow}_t \left(\frac{P}{F}, \tilde{i}_r, t \right) \quad (9)$$

$$\text{Min } G_{20} = \sum_t \sum_n \sum_p \sum_{m \in M_{pnt}} \left(dt_{pnt} - edt_{pnt} \right) x_{pnt0} \quad (10)$$

$$\text{Max } G_{30} = \sum_t \sum_p \frac{\sum_k \sum_j \frac{\sum_s R_s x_{jskt0}}{\delta_{pj}}}{\sum_n d_{pnt}} \quad (11)$$

$$\sum_m x_{pmt} \geq \tilde{d}_{pnt} \quad \forall p, n, t \quad (12)$$

$$\delta_{pj} \cdot Q_{pkt\omega} \leq \sum_s x_{jskt\omega} \quad \forall p, k, t, j, \omega \quad (13)$$

$$Q_{pkt\omega} \geq \sum_l x_{pklt\omega} \quad \forall p, k, t, \omega \quad (14)$$

$$\sum_k x_{pklt\omega} \geq \sum_m x_{plmt\omega} \quad \forall p, l, t, \omega \quad (15)$$

$$\sum_l x_{plmt\omega} \geq \sum_n x_{pnm\omega} \quad \forall p, m, t, \omega \quad (16)$$

$$\sum_p \gamma_p \cdot Q_{pkt\omega} \leq h_{k\tau} \cdot u_{k\tau} \quad \forall k, t, \tau, \omega \quad (17)$$

$$\sum_k \sum_p \alpha_p \cdot x_{pklt\omega} \leq h_{l\tau} \cdot u_{l\tau} \quad \forall l, t, \tau, \omega \quad (18)$$

$$\sum_l \sum_p \beta_p \cdot x_{plmt\omega} \leq h_{m\tau} \cdot u_{m\tau} \quad \forall m, t, \tau, \omega \quad (19)$$

$$\sum_s \sum_j \sum_t x_{jskt\omega} \leq M \times u_{k\tau} (1 - a_{k\omega}) \quad \forall k, \tau, \omega \quad (20)$$

$$\sum_k \sum_p \sum_t x_{pklt\omega} \leq M \times u_{l\tau} (1 - b_{l\omega}) \quad \forall l, \tau, \omega \quad (21)$$

$$\sum_l \sum_p \sum_t x_{plmt\omega} \leq M \times u_{m\tau} (1 - c_{m\omega}) \quad \forall m, \tau, \omega \quad (22)$$

$$\sum_\tau u_{k\tau} \leq 1 \quad \forall k \quad (23)$$

$$\sum_\tau u_{l\tau} \leq 1 \quad \forall l \quad (24)$$

$$\sum_\tau u_{m\tau} \leq 1 \quad \forall m \quad (25)$$

$$G_{1\omega} \geq G_{1\omega}^*(1-\varphi) \quad \forall \omega \quad (26)$$

$$G_{2\omega} \leq G_{2\omega}^*(1+\varphi) \quad \forall \omega \quad (27)$$

$$G_{3\omega} \geq G_{3\omega}^*(1-\varphi) \quad \forall \omega \quad (28)$$

$$\sum_{\tau} \sum_k u_{k\tau} \geq 1 \quad (29)$$

$$\sum_{\tau} \sum_l u_{l\tau} \geq 1 \quad (30)$$

$$\sum_{\tau} \sum_m u_{m\tau} \geq 1 \quad (31)$$

$$x_{jskt\omega}, x_{pklt\omega}, x_{plmt\omega}, x_{pmnt\omega}, Q_{pkt\omega} \geq 0 \quad (32)$$

$$\forall j, s, k, t, \omega, p, l, m, n$$

$$u_{k\tau}, u_{l\tau}, u_{m\tau} \in \{0, 1\} \quad \forall k, l, m, \tau \quad (33)$$

روابط (۹) تا (۱۱) توابع هدف را نشان می‌دهد که در آن هیچ اختلالی رخ ندهد. رابطه (۱۲) تضمین می‌کند که تقاضای مشتریان ارضا گردند. روابط (۱۳) تا (۱۶) جریان مواد بین تأمین کنندگان، کارخانه‌ها، مراکز تولید و انبارها را بالانس می‌کند. روابط (۱۷) تا (۱۹) محدودیت ظرفیت کارخانه‌ها، مراکز تولید و انبارها را در نظر می‌گیرد. روابط (۲۰) تا (۲۲) اولاً تضمین می‌کنند که در صورتی از یک تسهیل جریان مواد با سطح دیگر زنجیره تأمین وجود دارد که آن تسهیل افتتاح شده باشد. ثانیاً اختلال در هر سناریو را در نظر می‌گیرد. روابط (۲۳) تا (۲۵) بیانگر این موضوع هستند که در هر مکان کاندیدا برای هر تسهیل، حداکثر یک تسهیل با اندازه کوچک، متوسط یا بزرگ می‌تواند افتتاح گردد. محدودیت‌های (۲۶) تا (۲۸) شاخص استواری را برای هر یک از توابع هدف با توجه به بیشینه و یا کمینه بودن آن‌ها تعریف می‌کند. به عبارت دیگر تصمیماتی بایستی اتخاذ گردد که در صورت وقوع هر یک از سناریوها، خسارت و هزینه زیادی به زنجیره تأمین تحمیل نگردد. برای بدست آوردن G_{ω}^* (مقدار بهینه تابع هدف G_{ω} تحت سناریوی ω) مدل فوق بایستی با توجه به اندیس G_{ω} با استفاده از یکی از توابع هدف (۳) یا (۷) یا (۸) و بدون محدودیت‌های (۲۶) تا (۲۸) برای سناریو ω حل گردد. همانطور که مشاهده می‌گردد، با افزایش شاخص استواری تا بینهایت، روابط (۲۶) تا

(۲۸) غیرفعال می‌شوند. محدودیت‌های (۲۹) تا (۳۱) تضمین می‌کنند که از هر نوع تسهیل (کارخانه، مرکز توزیع و انبار) حداقل یکی افتتاح گردد. روابط (۳۲) و (۳۳) صفر و یک یا غیرمنفی بودن متغیرها را مشخص می‌کند.

روش حل

توزیع امکانی پارامترهای فازی بصورت مثلثی متقارن فرض شده و تابع عضویت اعداد فازی مثلثی بصورت زیر تعریف شده است:

$$\mu_A(x) = \begin{cases} 0 & x \leq a, x \geq c \\ \frac{x-a}{b-a} & a \leq x \leq b \\ \frac{c-x}{c-b} & b \leq x \leq c \end{cases}$$

تبدیل مدل ریاضی فازی ارائه شده به مدل ریاضی قطعی

با استفاده از گام‌های زیر مدل ریاضی ارائه شده به مدل ریاضی قطعی تبدیل می‌شوند:
گام اول. تعیین توزیع امکانی مناسب برای پارامترهای فازی که بصورت اعداد فازی مثلثی تعریف شده‌اند.

گام دوم. قطعی کردن توابع هدف. در این مقاله از روش ارزش و بازه مورد انتظار برای قطعی کردن پارامترهای فازی استفاده شده است. ارزش مورد انتظار $\tilde{A} \sim TFN(a, b, c)$ از طریق رابطه زیر بدست می‌آید:

$$EV(A) = \frac{a+2b+c}{4}$$

روابط (۳۴) تا (۳۷) نحوه قطعی کردن توابع هدف اول و سوم را نشان می‌دهند.

$$\tilde{E}_{pmnt} \otimes \tilde{t}_i = ETr_{pmnt} \sim TFN(ETr_{pmnt}^P, ETr_{pmnt}^M, ETr_{pmnt}^O) \quad (34)$$

$$dt_{pmnt} ! edt_{pmnt} = EDT_{pmnt} \sim TFN(EDT_{pmnt}^P, EDT_{pmnt}^M, EDT_{pmnt}^O) \quad (35)$$

$$\begin{aligned}
 cashflow_{\tau} = & \sum_p \sum_m \sum_n \left(\left(\frac{E_{pmt}^p + 2E_{pmt}^M + E_{pmt}^O}{4} \right) \cdot x_{pmt\omega} \right) - \left(\left(\frac{ETr_{pmt}^p + 2ETr_{pmt}^M + ETr_{pmt}^O}{4} \right) \cdot x_{pmt\omega} \right) - \sum_j \sum_i \sum_k \left(\left(\frac{W_{jst}^p + 2W_{jst}^M + W_{jst}^O}{4} \right) \cdot x_{jkt\omega} \right) \\
 & - \sum_k \sum_p \left(\left(\frac{\lambda_{pkt}^p + 2\lambda_{pkt}^M + \lambda_{pkt}^O}{4} \right) \cdot Q_{pkt\omega} \right) - \sum_l \sum_p \sum_k \left(\left(\frac{r_{pkt}^p + 2r_{pkt}^M + r_{pkt}^O}{4} \right) \cdot x_{pkt\omega} \right) - \sum_p \sum_m \sum_l \left(\left(\frac{r_{pml}^p + 2r_{pml}^M + r_{pml}^O}{4} \right) \cdot x_{pml\omega} \right) + \sum_j \sum_i \sum_k \left(\left(\frac{g_{jkt}^p + 2g_{jkt}^M + g_{jkt}^O}{4} \right) \cdot x_{jkt\omega} \right) + \\
 & \sum_p \sum_i \sum_l \left(\left(\frac{g_{pkt}^p + 2g_{pkt}^M + g_{pkt}^O}{4} \right) \cdot x_{pkt\omega} \right) + \sum_p \sum_l \sum_m \left(\left(\frac{g_{pml}^p + 2g_{pml}^M + g_{pml}^O}{4} \right) \cdot x_{pml\omega} \right) + \sum_p \sum_m \sum_n \left(\left(\frac{g_{pmt}^p + 2g_{pmt}^M + g_{pmt}^O}{4} \right) \cdot x_{pmt\omega} \right)
 \end{aligned} \tag{۳۶}$$

$$G_{2\omega} = \sum_t \sum_n \sum_p \sum_{m \in M_{pmt}} \left(\frac{EDT_{pmt}^p + 2EDT_{pmt}^M + EDT_{pmt}^O}{4} \right) \cdot x_{pmt\omega} \tag{۳۷}$$

گام سوم. محدودیت فازی (رابطه (۱۲)) با توجه به حداقل سطح امکان پذیری قابل قبول (که با θ نشان داده می شود) برای پارامتر غیرقطعی تقاضا بصورت رابطه (۳۸) به محدودیت قطعی تبدیل می گردد.

$$\sum_m x_{pmt} \geq \theta \left(\frac{d_{pmt}^M + d_{pmt}^O}{2} \right) + (1 - \theta) \left(\frac{d_{pmt}^p + d_{pmt}^M}{2} \right) \tag{۳۸}$$

حل مدل ریاضی چندهدفه ارائه شده

با استفاده از گام های زیر به حل مدل ریاضی چندهدفه می پردازیم:

گام اول. تعیین جواب ایده آل مثبت و منفی برای هر تابع هدف.

گام دوم. تعیین تابع عضویت خطی برای هر تابع هدف

گام سوم. تبدیل مدل موجود به یک مدل معادل تک هدفه با استفاده از روش TH

گام چهارم: حل مدل قطعی تک هدفه

- تعیین جواب ایده آل مثبت و منفی (PIS و NIS) برای هر تابع هدف.

به منظور کاهش پیچیدگی محاسباتی در این مقاله جوابهای ایده آل منفی، بجای حل یک

مدل برنامه ریزی خطی عدد صحیح مجزا، با استفاده از جوابهای ایده آل مثبت تخمین زده

شده است. فرض کنید v_{ξ}^* و $G_{\xi}(v_{\xi}^*)$ به ترتیب بردار تصمیم مربوط به جواب ایده آل مثبت

تابع هدف ξ ام، و مقدار آنرا نشان می‌دهند. بنابراین جواب ایده آل منفی مربوطه بصورت زیر تخمین زده می‌شود:

$$G_{\xi}^{NIS} = \min \{G_{\xi}(v_1^*), G_{\xi}(v_2^*), G_{\xi}(v_3^*)\}; \xi = 1, 3$$

$$G_{\xi}^{NIS} = \max \{G_{\xi}(v_1^*), G_{\xi}(v_2^*), G_{\xi}(v_3^*)\}; \xi = 2$$

• تعیین تابع عضویت خطی برای هر تابع هدف.

روابط (۳۹) تا (۴۱) توابع عضویت خطی تعریف شده برای هر یک از توابع هدف را با توجه به نوع آن‌ها نشان می‌دهند.

$$\mu_1(v) = \begin{cases} 1 & G_1 \geq G_1^{PIS} \\ \frac{G_1 - G_1^{NIS}}{G_1^{PIS} - G_1^{NIS}} & G_1^{NIS} \leq G_1 \leq G_1^{PIS} \\ 0 & G_1 \leq G_1^{NIS} \end{cases} \quad (39)$$

$$\mu_2(v) = \begin{cases} 1 & G_2 \leq G_2^{PIS} \\ \frac{G_2^{NIS} - G_2}{G_2^{NIS} - G_2^{PIS}} & G_2^{PIS} \leq G_2 \leq G_2^{NIS} \\ 1 & G_2 \geq G_2^{NIS} \end{cases} \quad (40)$$

$$\mu_3(v) = \begin{cases} 1 & G_3 \geq G_3^{PIS} \\ \frac{G_3 - G_3^{NIS}}{G_3^{PIS} - G_3^{NIS}} & G_3^{NIS} \leq G_3 \leq G_3^{PIS} \\ 0 & G_3 \leq G_3^{NIS} \end{cases} \quad (41)$$

• تبدیل مدل موجود به یک مدل معادل تک هدفه با استفاده از روش **TH**

(Torabi & Hassini, 2008) که در رابطه (۴۲) نشان داده شده است:

$$\begin{aligned} \max \sigma(v) &= \eta\sigma_0 + (1-\eta) \cdot (\theta_1 \cdot \mu_1(v) + \theta_2 \cdot \mu_2(v) + \theta_3 \cdot \mu_3(v)) \\ \sigma_0 &\leq \mu_1(v) \\ \sigma_0 &\leq \mu_2(v) \\ \sigma_0 &\leq \mu_3(v) \\ v &\in F(v), \eta, \sigma_0 \in [0,1] \end{aligned}$$

(۴۲)

که در آن $\mu_\xi(v)$ و $\sigma_0 = \min_\xi \{h_\xi(v)\}$ سطح رضایت مندی تابع هدف ξ ام و حداقل سطح رضایت مندی توابع هدف را نشان می‌دهند. تابع هدف در رابطه (۴۲) بصورت ترکیب محدبی از حد پایین سطح رضایتمندی توابع هدف (σ_0) و مجموع وزنی سطوح توابع عضویت آن‌ها $\mu_\xi(v)$ بمنظور اطمینان یافتن از دستیابی به یک جواب متوازن قابل تنظیم تعریف شده است. همچنین θ_ξ اهمیت نسبی تابع هدف ξ ام را نشان می‌دهند. مقادیر θ_ξ براساس اولویتهای تصمیم گیرنده تعیین می‌شوند که مجموع آنها برابر با یک است. پارامتر η میزان اهمیت حد پایین درجه رضایت توابع هدف و بتبع آن میزان اهمیت متوازن بودن آنها را تعیین می‌کند.

• حل مدل قطعی (رابطه (۴۲)).

اگر تصمیم گیرنده از جواب کارای بدست آمده فعلی راضی باشد، حل متوقف می‌گردد. در غیر اینصورت یک جواب کارای دیگر از طریق تغییر مقدار برخی از پارامترهای قابل کنترل مانند θ و η و تکرار گام‌های ۳ تا ۷ تولید می‌گردد.

الگوریتم ژنتیک

بدلیل ماهیت NP-Hard مدل ریاضی ارائه شده برای طراحی زنجیره تأمین، از الگوریتم ژنتیک برای حل مدل ریاضی در مسائل نمونه با ابعاد بزرگ استفاده شده است. نمایش جواب یکی از مهمترین گام‌های طراحی الگوریتم ژنتیک در حل مدل ریاضی است و تا حد امکان می‌بایست بنحوی طراحی گردد که اکثر محدودیت‌های مدل ریاضی ارضا گردد.

متغیرهای تصمیم مدل ریاضی ارائه شده را می‌توان به دو گروه متغیرهای تصمیم سطح استراتژیک^۱ و سطح تاکتیکی تفکیک نمود که متغیرهای تصمیم u_{kt} ، u_{lt} و u_{mt} که مرتبط با افتتاح یا عدم افتتاح تسهیل هستند، متغیرهای تصمیم استراتژیک بوده و متغیرهای تصمیم $x_{jkt\omega}$ ، $x_{pkl\omega}$ ، $x_{plm\omega}$ ، $x_{pmn\omega}$ و $Q_{pk\omega}$ که مرتبط با میزان تولید و یا حمل و نقل محصول هستند، متغیرهای تصمیم سطح تاکتیکی بوده و وابسته به تصمیمات اتخاذ شده در سطح استراتژیک هستند. برای مثال زمانی از محصول از کارخانه k به مرکز توزیع l می‌تواند انتقال پیدا کند (متغیر $x_{pkl\omega}$) که هم در مکان k کارخانه (u_{kt}) و هم در مکان l مرکز توزیع (u_{lt}) افتتاح شده باشد (روابط (۲۰) و (۲۱)).

باتوجه به توضیحات فوق، با دو نوع متغیرهای باینری و پیوسته مواجه هستیم. جواب برای متغیرهای باینری بصورت کروموزوم‌های باینری نمایش داده می‌شود. لیکن برای نمایش متغیرهای پیوسته از کروموزوم‌های پیوسته با اعداد بین صفر و یک استفاده می‌گردد که باتوجه به کروموزوم‌های باینری تولید شده و همچنین روابط (۱۳) تا (۱۶) می‌توان مقدار خود متغیر-های پیوسته را استخراج نمود. از این رو، با استفاده از نمایش جواب تشریح شده، تمامی محدودیت‌های ارائه شده برای مدل ریاضی، غیراز محدودیت‌های مربوط به ظرفیت تسهیلات، ارضا می‌گردند و برای محدودیت‌های ظرفیت، جریمه برای مقدار تابع هدف در نظر گرفته می‌شود. لازم به توضیح است که برای بکارگیری الگوریتم ژنتیک نیز باید از مدل قطعی تک هدفه ارائه شده (بخش‌های ۱-۳ و ۲-۳ مقاله) استفاده گردد.

تولید دو کروموزوم جدید از کروموزوم‌های والدین (عملگر تقاطع)، به صورت زیر انجام شده است:

۱. تولید ماتریسی (با نام α) بصورت تصادفی به اندازه کروموزوم یکی از والدین با

شرایط زیر:

- برای کروموزوم‌های باینری، ماتریس فقط شامل اعداد صفر و یک است.
- برای کروموزوم‌های پیوسته، ماتریس شامل اعداد بین صفر و یک است.

۲. تولید دو فرزند جدید با توجه به کروموزوم‌های والدین و ماتریس α با استفاده از رابطه (۴۳) و (۴۴):

$$offspring_1 = \alpha \times parent_1 + (1 - \alpha) \times parent_2 \quad (43)$$

$$offspring_2 = (1 - \alpha) \times parent_1 + \alpha \times parent_2 \quad (44)$$

که در آن $offspring_1$ و $offspring_2$ به ترتیب کروموزوم مربوط به فرزند ۱ و ۲ حاصل از کروموزوم‌های والدین (به ترتیب $parent_1$ و $parent_2$) هستند.

در عملگر جهش نیز برای کروموزوم باینری، برخی از ژن‌ها به تصادف انتخاب شده (تعداد ژن انتخاب شده یکی از پارامترهای الگوریتم ژنتیک است که بایستی مشخص گردد) و در صورتیکه مقدار آن صفر باشد به مقدار یک تغییر پیدا می‌کند و بالعکس. برای کروموزوم پیوسته نیز مانند حالت فوق‌الذکر، تعدادی ژن به تصادف انتخاب شده و عددی با استفاده از توزیع نرمال با میانگین مقدار خود ژن انتخاب شده و انحراف استاندارد ۰/۱ جایگزین ژن می‌گردد.

مثال‌های عددی

نحوه تولید اعداد تصادفی برای هر پارامتر مدل ریاضی در جدول ۱ نشان داده شده است که در آن:

$U(a,b)$: توزیع احتمال یکنواخت پیوسته بین a و b ؛

$N(\mu,\sigma)$ توزیع احتمال نرمال با میانگین μ و انحراف استاندارد σ ؛

$exp(\lambda)$ توزیع احتمال نمایی با میانگین $1/\lambda$ ؛ است.

جدول (۱): داده‌های تولید شده بطور تصادفی

پارامتر	توزیع احتمالی	پارامتر	توزیع احتمالی	پارامتر	توزیع احتمالی	پارامتر	توزیع احتمالی	پارامتر	توزیع احتمالی
g_{jskt}	$U(1, 4)$	d_{pnt}	$N(2500, 700)$	$h_{k\tau}$	$U(10^6, 4 \times 10^6)$	$f_{k\tau}$	$U(10^6, 4 \times 10^6)$	$h_{l\tau}$	$U(3 \times 10^4, 4 \times 10^4)$
g_{pklt}	$U(0.7, 3/8)$	γ_p	$N(0.18, 0.033)$		$U(4 \times 10^6, 7 \times 10^6)$		$U(7 \times 10^6, 10^7)$		
g_{plmt}	$U(0.6, 4/5)$	α_p	$N(2, 0.5)$		$U(7 \times 10^6, 10^7)$		$U(7 \times 10^6, 10^7)$		
g_{pmnt}	$U(1/5, 50)$	β_p	$N(1/5, 0.25)$		$U(3 \times 10^4, 7 \times 10^4)$		$U(3 \times 10^4, 7 \times 10^4)$		

$U(4 \times 10^4, 5 \times 10^4)$	۲		$U(7 \times 10^4, 10^5)$	۲		$U(3, 8)$	δ_{pi}	$U(10, 20)$	V_{kt}
$U(5 \times 10^4, 6/5 \times 10^4)$	۳		$U(10^5, 1/5 \times 10^5)$	۳		$U(3, 9)$	W_{jst}	$U(7, 10)$	V_{lt}
$U(8 \times 10^3, 11 \times 10^3)$	۱		$U(5 \times 10^3, 7 \times 10^3)$	۱		$U(7, 14)$	λ_{pkt}	$U(2, 5)$	$V_{m\tau}$
$U(1/1 \times 10^4, 1/4 \times 10^4)$	۲	$h_{m\tau}$	$U(7 \times 10^3, 10^4)$	۲	$f_{m\tau}$	$U(1, 3)$	\tilde{r}_{plt}	$N(0/25, 0/03)$	Tr_t
$U(1/4 \times 10^4, 1/6 \times 10^4)$	۳		$U(10^4, 1/6 \times 10^4)$	۳		$U(1/5, 3/5)$	\tilde{r}_{pmt}	$Exp(5)$	if_t
						$U(25, 35)$	E_{pmnt}	$N(0/12, 0/01)$	\tilde{i}_t
								$U(0/6, 1)$	R_s

به منظور نمایش قابلیت کاربرد مدل، ۲۲ مسأله نمونه حل شده اند. برای ابعاد کوچک و متوسط (مسائل ۱ تا ۱۶) از نرم افزار GAMS 23.6 برای حل مدل ارائه شده استفاده گردیده است، لیکن به دلیل ماهیت NP-Hard مدل ریاضی، نرم افزار فوق الذکر قابلیت حل برای ابعاد بزرگ مسأله را نداشته و از الگوریتم ژنتیک استفاده شده است. لازم به توضیح است از نرم افزار MATLAB R2013b برای اجرای الگوریتم ژنتیک طراحی شده بهره گرفته شده است. پارامترهای تعداد جمعیت اولیه، درصد اعمال عملگر تقاطع و جهش و تعداد تکرارهای الگوریتم با استفاده از سعی و خطا به ترتیب ۲۰۰، ۰/۷، ۰/۲ و ۱۰۰ تکرار تعیین شدند. تعداد تأمین کننده، کارخانه، مراکز توزیع، انبار، مشتری، دوره و مواد در نظر گرفته شده برای هر مسأله نمونه در جدول ۲ ارائه شده است. مسأله طراحی شبکه زنجیره تأمین را می توان به صورت یک زنجیره تولید یک محصوله یا چند محصوله در نظر گرفت. در این مقاله مسائل به صورت زنجیره تأمین تک محصوله و در افق برنامه ریزی میان مدت فرض شده اند. در تمامی مثال ها سه سناریو برای اختلال در نظر گرفته شده است که در سناریوهای یک تا سه به ترتیب یکی از کارخانه ها، مراکز توزیع و انبارها دچار اختلال می گردند. شاخص استواری تمامی توابع هدف نیز ۰/۶ در نظر گرفته شده است.

جدول (۲): مسائل نمونه برای زنجیره تأمین تک محصولی

۲	۲	۲	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۹	۸	۷	۶	۵	۴	۳	۲	۱	شماره مسأله
۲	۱	۰	۹	۸	۷	۶	۵	۴	۳	۲	۱	۰												
۳	۳	۳	۲	۲	۲	۱	۱	۷	۵	۴	۳	۴	۴	۳	۳	۴	۲	۳	۴	۲	۲			k
۳	۳	۰	۷	۶	۰	۶	۰																	
۳	۳	۲	۲	۲	۱	۱	۹	۶	۴	۳	۲	۲	۳	۳	۳	۳	۲	۳	۲	۲	۲			l
۳	۲	۸	۵	۵	۹	۶																		
۳	۳	۲	۲	۲	۱	۱	۱	۸	۶	۵	۴	۴	۴	۴	۳	۳	۶	۴	۷	۲	۲			m
۵	۱	۵	۳	۱	۷	۴	۱																	
۳	۲	۲	۲	۲	۱	۱	۱	۹	۷	۵	۵	۴	۴	۵	۵	۴	۴	۴	۴	۴	۴	۴	۴	n
۴	۹	۶	۲	۲	۶	۵	۱																	
۳	۳	۲	۲	۲	۱	۱	۸	۵	۴	۲	۳	۲	۲	۲	۴	۳	۲	۳	۲	۳	۲			s
۲	۱	۷	۵	۰	۸	۳																		
۳	۳	۲	۲	۱	۱	۱	۹	۶	۴	۲	۳	۵	۲	۳	۲	۳	۲	۲	۲	۲	۲			j
۱	۱	۸	۴	۸	۷	۴																		
۲	۲	۲	۲	۱	۱	۱	۹	۶	۴	۳	۴	۳	۳	۴	۴	۳	۴	۴	۳	۴	۳			t
۸	۷	۷	۴	۶	۶	۴																		

نتایج و بررسی آنها

برای اعتبارسنجی عملکرد الگوریتم ژنتیک در حل مدل ریاضی ارائه شده، از این الگوریتم برای حل تمامی مسائل نمونه استفاده شده و عملکرد آن برای مسائل با ابعاد کوچک و متوسط با جواب‌های دقیق بدست آمده با نرم‌افزار GAMS مقایسه گردیده است و نتایج نشانگر عملکرد مناسب الگوریتم طراحی شده در حل مسأله می‌باشد. مقدار توابع عضویت و

مقدار تابع هدف تجمیع شده به همراه درصد خطای نسبی نتایج الگوریتم ژنتیک نسبت به نتایج نرم افزار GAMS در جدول ۳ ارائه شده است.

آنالیز حساسیت

پارامترهای گوناگون آثار مختلفی بر روی مقادیر توابع عضویت دارند. بنابراین با تغییر پارامترها بطور جداگانه یا همزمان می توان نتایج مختلفی به دست آورد. در این بخش آنالیز حساسیت بر روی پارامترهای مختلف در مثال ۱ (جدول ۱) صورت گرفته است.

روش TH یک روش تعاملی است که با استفاده از تعیین اولویت های گوناگون تصمیم گیرنده برای توابع هدف و وزنهای مختلف برای درجه رضایت هر تابع هدف (که در جدول ۴ نشان داده شده است)، جواب های متفاوتی به دست می آورد. همانگونه که در جدول ۴ مشاهده می گردد، با افزایش پارامتر 77، مقادیر درجه رضایت توابع هدف مقادیر متوازن تری داشته و از حد پایین درجه رضایت بهتری برخوردارند.

تغییرات شاخص استواری، پارامتر مهم دیگری است که آنالیز حساسیت آن از اهمیت ویژه ای برخوردار می باشد. همانطور که در جدول ۵ مشاهده می گردد، افزایش مقدار شاخص استواری باعث افزایش مقدار رضایت توابع هدف گردیده است. این موضوع را اینگونه می توان توجیه نمود که با افزایش این شاخص تا بینهایت، محدودیت های (۲۶) تا (۲۸) غیرفعال شده و اهمیت کمتری به ریسک اختلال داده شده و در نهایت توابع هدف از درجه رضایت بیشتری برخوردار خواهند بود.

نتیجه گیری

در این مقاله مسأله طراحی شبکه زنجیره تامین که شامل تأمین کنندگان، کارخانه ها، مراکز توزیع، انبارها و مشتریان می باشد مطالعه شده است. این مسأله شامل انتخاب محل کارخانه ها و مراکز توزیع از میان مکان های از پیش تعیین شده و تعیین مقدار مواد و محصولات که باید

از مراحل مختلف شبکه زنجیره تأمین منتقل شوند با توجه به ریسک اختلال، ریسک عرضه و ریسک تقاضا می‌باشد. عوامل اقتصادی مانند نرخ مالیات، نرخ بهره و نرخ تورم غیرقطعی بوده و به صورت اعداد فازی در مدل در نظر گرفته شده‌اند. جهت اطمینان یافتن از سطح بالای عملکرد زنجیره تأمین در صورت رخداد اختلال، شاخص استواری با استفاده از رویکرد مدل‌سازی مبتنی بر سناریوها، به کار گرفته شده است. علاوه بر پیشینه‌سازی ارزش خالص فعلی در آمد، توابع هدف کمینه‌سازی تأخیر در زمان تحویل محصول نهایی به مشتریان و پیشینه‌سازی قابلیت اطمینان تأمین کنندگان در تحویل مواد اولیه نیز در مدل ارائه شده در نظر گرفته شده‌اند.

برای حل، ابتدا مدل ارائه شده به مدل قطعی تبدیل شده سپس مدل چندهدفه قطعی به دست آمده با استفاده از روش TH حل گردیده است. برای نشان دادن عملکرد مدل ارائه شده چندین مثال عددی ارائه و برای مسائل با ابعاد کوچک و متوسط در نرم افزار GAMS کدنویسی و برای ابعاد بزرگ با استفاده از الگوریتم ژنتیک حل شده است و در نهایت آنالیز حساسیت بر روی پارامترهای مختلف صورت گرفته است. در نظر گرفتن سناریوهای بیشتر برای ریسک اختلال را بعنوان پیشنهادات آتی برای این مطالعه می‌توان در نظر گرفت.

جدول (۳): نتایج حل مسائل نمونه

$$\theta_1 = 0.75, \theta_2 = 0.2, \theta_3 = 0.05, \eta = 0.9, \vartheta = 0.8, \varphi = 0.6$$

درصد خطای نسبی	الگوریتم ژنتیک			GAMS			شماره مسأله		
	σ	μ_3	μ_2	μ_1	σ	μ_3		μ_2	μ_1
۲/۸۹	۰/۶۹	۰/۷۲۲	۰/۸۰۶	۰/۶۷۸	۰/۷۱	۰/۷۰۶	۰/۸۱۲	۰/۷۱۲	۱
۲/۱۷	۰/۳۱۳	۰/۳	۰/۶۱۱	۰/۳۳۴	۰/۳۰۳	۰/۲۸۹	۰/۶۳۳	۰/۳۲۲	۲
۱/۵۶	۰/۳۴۵	۰/۵۲۲	۰/۵۳۵	۰/۳۰۳	۰/۳۵	۰/۵۴۳	۰/۵۴۵	۰/۳۰۵	۳
۲/۵۱	۰/۳۰۸	۰/۲۸۱	۰/۸۵۴	۰/۶۹۷	۰/۳۰۱	۰/۲۷۳	۰/۸۵۸	۰/۶۸۳	۴
۴/۱۷	۰/۳۲۷	۰/۳۰۳	۰/۸۲۸	۰/۵۶۸	۰/۳۴۱	۰/۳۱۸	۰/۸۲۷	۰/۵۶۳	۵
۶/۵۴	۰/۲۰۴	۰/۴۱۸	۰/۳۴۶	۰/۱۵۷	۰/۱۹۱	۰/۳۸۸	۰/۳۴۷	۰/۱۴۷	۶

۰/۱۳	۰/۳۲۵	۰/۳۰۱	۰/۸۴۷	۰/۴۹۱	۰/۳۲۶	۰/۳۰۲	۰/۸۳۵	۰/۵۲۱	۷
۳/۱۲	۰/۲۹۸	۰/۲۷۵	۰/۸۳۳	۰/۳۹۱	۰/۳۰۸	۰/۲۸۵	۰/۸۳۱	۰/۴۱۱	۸
۱/۶۷	۰/۳۹۵	۰/۳۷۶	۰/۷۸۴	۰/۶۲۳	۰/۴۰۲	۰/۳۸۵	۰/۷۴۸	۰/۶۳۲	۹
۱/۰۹	۰/۶۴۹	۰/۹۰۹	۰/۶۰۲	۰/۷۲۵	۰/۶۴۲	۰/۸۹۷	۰/۵۹۶	۰/۷۲۳	۱۰
۰/۱۶	۰/۲۹۷	۰/۲۷۲	۰/۸۵	۰/۵۱۶	۰/۲۹۷	۰/۲۷۳	۰/۸۱۴	۰/۴۹۳	۱۱
۰/۶۷	۰/۳۳۴	۰/۳۱۳	۰/۸۲۸	۰/۳۵۵	۰/۳۳۲	۰/۳۱	۰/۸۴۲	۰/۳۶۱	۱۲
۱/۷۹	۰/۴۷۹	۰/۴۶۵	۰/۸۰۲	۰/۴۷۷	۰/۴۷۱	۰/۴۸۵	۰/۷۹۱	۰/۴۵۲	۱۳
۱/۷۲	۰/۵۵۲	۰/۵۸	۰/۸۱۸	۰/۵۳۴	۰/۵۴۳	۰/۵۶۸	۰/۸۲۳	۰/۵۲۴	۱۴
۱/۴۴	۰/۳۱۱	۰/۶۵۲	۰/۷۵۸	۰/۲۲۶	۰/۳۱۶	۰/۶۵۳	۰/۷۴۶	۰/۲۳۲	۱۵
۰/۱۹	۰/۴۴	۰/۴۹	۰/۶۳۷	۰/۴۲۲	۰/۴۴۱	۰/۵۱۲	۰/۶۲۵	۰/۴۱۹	۱۶
-	۰/۳۹۹	۰/۴۱۸	۰/۶۵۷	۰/۳۸۳	-	۰/۴۳۱	۰/۷۰۱	۰/۳۹۶	۱۷
-	۰/۳۶۳	۰/۳۴۹	۰/۶۹	۰/۳۸۶	-	۰/۳۴۴	۰/۷۱۷	۰/۴۱۶	۱۸
-	۰/۳۶۷	۰/۳۶۵	۰/۶۳۳	۰/۳۵۴	-	۰/۳۸۵	۰/۶۶۲	۰/۳۵۱	۱۹
-	۰/۲۷۳	۰/۴۴	۰/۸۳۱	۰/۲۱۵	-	۰/۴۲۱	۰/۸۲۳	۰/۲۱۸	۲۰
-	۰/۳۳۱	۰/۳۱۲	۰/۷۵۳	۰/۳۷۹	-	۰/۳۲۵	۰/۷۲۴	۰/۳۸۵	۲۱
-	۰/۴۵۵	۰/۴۵۹	۰/۷۰۷	۰/۴۴۱	-	۰/۴۲۳	۰/۷۱۴	۰/۴۵۲	۲۲

جدول (۴): آنالیز حساسیت بر روی وزن‌های درجه رضایت توابع هدف و ضریب جبران

$$\vartheta = 0.8, \varphi = 0.6$$

$(\theta_1, \theta_2, \theta_3)$						$\mu_i(v)$	η
(۰/۵, ۰/۴, ۰/۱)	(۰/۶, ۰/۳, ۰/۱)	(۰/۷, ۰/۱, ۰/۲)	(۰/۷۵, ۰/۲, ۰/۰۵)	(۰/۸۵, ۰/۰۷۵, ۰/۰۷۵)	(۰/۹, ۰/۰۵, ۰/۰۵)		
۰/۵۵۶	۰/۷۵۵	۰/۷۷۴	۰/۷۰۸	۰/۸۲	۰/۸۳۱	$\mu_1(v)$	۰/۱
۰/۹۸	۰/۸۹۷	۰/۷۸۲	۰/۸۷۴	۰/۷	۰/۶۸۵	$\mu_2(v)$	

۰/۶۰۶	۰/۶۱۴	۰/۷۷۸	۰/۶۱۱	۰/۶۴۴	۰/۶۵۹	$\mu_3(v)$	۰/۳
۰/۵۵۵	۰/۵۶۲	۰/۵۵	۰/۵۷۷	۰/۷۵۱	۰/۷۲۹	$\mu_1(v)$	
۰/۷۹۷	۰/۷۹۲	۰/۷۸۵	۰/۸۹۴	۰/۸۷۷	۰/۸۸۵	$\mu_2(v)$	
۰/۷۱	۰/۶۸۳	۰/۶۶۴	۰/۵۲۳	۰/۶۵۱	۰/۷۴۴	$\mu_3(v)$	
۰/۷۲۴	۰/۷۱۴	۰/۷۳۷	۰/۷۶۳	۰/۷۱۶	۰/۷۹۲	$\mu_1(v)$	۰/۵
۰/۸۸۵	۰/۸۸۷	۰/۸۸۳	۰/۸۸۱	۰/۸۹	۰/۷۸۳	$\mu_2(v)$	
۰/۶۴	۰/۶۰۹	۰/۵۱۶	۰/۵۲۶	۰/۶۲۵	۰/۶۰۷	$\mu_3(v)$	
۰/۵۷۶	۰/۵۷۶	۰/۵۶۳	۰/۷۵۱	۰/۷۲۲	۰/۷۰۳	$\mu_1(v)$	۰/۷
۰/۹۱۱	۰/۸۹۲	۰/۸۷۹	۰/۹۵۶	۰/۸۷۹	۰/۸۸۶	$\mu_2(v)$	
۰/۶۲۷	۰/۶۱۸	۰/۵۹۹	۰/۶۰۵	۰/۶۳۲	۰/۶۱۱	$\mu_3(v)$	
۰/۶۷۶	۰/۶۸۷	۰/۶۹۷	۰/۷۱۲	۰/۷۲۷	۰/۷۳۲	$\mu_1(v)$	۰/۹
۰/۸۹۲	۰/۹۷۶	۰/۸۲۲	۰/۸۱۲	۰/۷۸۷	۰/۷۸۲	$\mu_2(v)$	
۰/۷۲۱	۰/۶۹۸	۰/۷۳۵	۰/۷۰۶	۰/۷۰۱	۰/۷۳۴	$\mu_3(v)$	

جدول (۵): آنالیز حساسیت بر روی $\varphi_{robustness}$

$$\theta_1 = 0.75, \theta_2 = 0.2, \theta_3 = 0.05, \eta = 0.9, \vartheta = 0.8$$

φ						$\mu_i(v)$
۰/۸	۰/۷	۰/۶	۰/۵	۰/۴	۰/۳	
۰/۷۶۲	۰/۷۳۵	۰/۷۱۲	۰/۷۱۵	۰/۷۰۶	۰/۷۰۱	$\mu_1(v)$
۰/۸۳۹	۰/۸۲۹	۰/۸۱۲	۰/۸۰۲	۰/۷۹۲	۰/۷۸۲	$\mu_2(v)$
۰/۷۲۸	۰/۷۱۸	۰/۷۰۶	۰/۷۰۱	۰/۷۱۸	۰/۷۲۵	$\mu_3(v)$

منابع

حیاتی، م.، عطایی، م.، خالو کاکایی، ر.، صیادی، ا.ر.، ارائه مدلی برای ارزیابی ریسک‌های زنجیره تأمین با استفاده از تکنیک‌های تصمیم‌گیری چندشاخصه، فصلنامه مطالعات مدیریت صنعتی، دوره ۱۲، شماره ۳۴، ۱۳۹۳، ۱۹-۴۰.

میرغفوری، س.ح.، شریف آبادی، ع.م.، اسدیان اردکانی، ف.، طراحی مدلی برای ارزیابی ریسک در زنجیره تأمین با رویکرد شبکه عصبی مصنوعی (مطالعه موردی: شرکت فولاد آلیاژی ایران-یزد)، فصلنامه مطالعات مدیریت صنعتی، دوره ۱۱، شماره ۳۰، ۱۳۹۳، ۱-۲۱.

Azaron, A., Brown, K., Tarim, S., & Modarres, M. (2008). A multi-objective stochastic programming approach for supply chain design considering risk. *International Journal of Production Economics*, 116(1), 129-138 .

Benyoucef, L., Xie, X., & Tanonkou, G. A. (2013). Supply chain network design with unreliable suppliers: a Lagrangian relaxation-based approach. *International Journal of Production Research*, 51(21), 6435-6454.

Farahani, R. Z., Hassani, A., Mousavi, S. M., & Baygi, M. B. (2014). A hybrid artificial bee colony for disruption in a hierarchical maximal covering location problem. *Computers & Industrial Engineering*, 75, 129-141.

Gaudenzi, B., & Borghesi, A. (2006). Managing risks in the supply chain using the AHP method. *International Journal of Logistics Management, The*, 17(1), 114-136 .

Georgiadis, M. C., Tsiakis, P., Longinidis, P., & Sofioglou, M. K. (2011). Optimal design of supply chain networks under uncertain transient demand variations. *Omega*, 39(3), 254-272 .

Goh, M., Lim, J., & Meng, F. (2007). A stochastic model for risk management in global supply chain networks. *European Journal of Operational Research*, 182(1), 164-173 .

Gumus, A. T., Guneri, A. F., & Keles, S. (2009). Supply chain network design using an integrated neuro-fuzzy and MILP approach: A

comparative design study. *Expert Systems with Applications*, 36(10), 12570-12577 .

Hahn, G. J., & Kuhn, H. (2012). Value-based performance and risk management in supply chains: A robust optimization approach. *International Journal of Production Economics*, 139(1), 135-144 .

Li, Q., Zeng, B., & Savachkin, A. (2013). Reliable facility location design under disruptions. *Computers & Operations Research*, 40(4), 901-909.

Lin, C.-C., & Wang, T.-H. (2011). Build-to-order supply chain network design under supply and demand uncertainties. *Transportation Research Part B: Methodological*, 45(8), 1162-1176 .

Liu, Z., & Cruz, J. M. (2012). Supply chain networks with corporate financial risks and trade credits under economic uncertainty. *International Journal of Production Economics*, 137(1), 55-67 .

Nagurney, A. (2010). (Supply chain network design under profit maximization and oligopolistic competition. *Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review*, 46(3), 281-294 .

Nickel, S., Saldanha-da-Gama, F., & Ziegler, H.-P. (2012). A multi-stage stochastic supply network design problem with financial decisions and risk management. *Omega*, 40(5), 511-524 .

Peng, P., Snyder, L. V., Lim, A., & Liu, Z. (2011). Reliable logistics networks design with facility disruptions. *Transportation Research Part B: Methodological*, 45(8), 1190-1211 .

PrasannaVenkatesan, S., & Kumanan, S. (2012). Multi-objective supply chain sourcing strategy design under risk using PSO and simulation. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 61(1-4), 325-337 .

Qin, Y. (۲۰۱۱). *On Flexible Strategy for Operation Risk in Supply Chain*. Paper presented at the Computational Sciences and Optimization (CSO), 2011 Fourth International Joint Conference on.

Rezapour, S., & Farahani, R. Z. (2010). Strategic design of competing centralized supply chain networks for markets with deterministic demands. *Advances in Engineering Software*, 41(5), 810-822 .

Singh, A. R., Mishra, P., Jain, R., & Khurana, M. (2012). Design of global supply chain network with operational risks. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 60(1-4), 273-290 .

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

Speier, C., Whipple, J. M., Closs, D. J., & Voss, M. D. (2011). Global supply chain design considerations: Mitigating product safety and security risks. *Journal of Operations Management*, 29(7), 721-736 .

Torabi, S., & Hassini, E. (2008). An interactive possibilistic programming approach for multiple objective supply chain master planning. *Fuzzy Sets and Systems*, 159(2), 193-214 .

Tuncel, G., & Alpan, G. (2010). Risk assessment and management for supply chain networks: A case study. *Computers in industry*, 61(3), 250-259 .

Wu, T., Blackhurst, J., & Chidambaram, V. (2006). A model for inbound supply risk analysis. *Computers in industry*, 57(4), 350-365 .

Zsidisin, G. A., & Ritchie, B. (2008). *Supply chain risk: a handbook of assessment, management, and performance* (Vol. 124): Springer.