



طراحی مدل شبکه تأمین درهم آمیخته با محوریت تاب‌آوری

فرحناز رحمانی مبینی^۱، اکبر عالم تبریز^{۲*}، مصطفی زندیه^۳، داوود طالبی^۴

۱. دانشجوی دکتری، گروه مدیریت صنعتی و فناوری اطلاعات، دانشکده مدیریت و حسابداری، دانشگاه شهید بهشتی، تهران، ایران
۲. استاد گروه مدیریت صنعتی و فناوری اطلاعات، دانشکده مدیریت و حسابداری، دانشگاه شهید بهشتی، تهران، ایران
۳. استاد گروه مدیریت صنعتی و فناوری اطلاعات، دانشکده مدیریت و حسابداری، دانشگاه شهید بهشتی، تهران، ایران
۴. استادیار گروه مدیریت صنعتی و فناوری اطلاعات، دانشکده مدیریت و حسابداری، دانشگاه شهید بهشتی، تهران، ایران

خلاصه

اطلاعات مقاله

اخیراً زنجیره‌های تأمین و شبکه‌های تأمین در حال توسعه به سمت شبکه‌های تأمین درهم آمیخته‌اند. این ساختارهای جدید، پویا و در حال تکامل، متفاوت از زنجیره‌تأمین‌های خطی با ساختارهای ایستا هستند و نیاز به بازنگری در برخی از مفاهیم سنتی دارند. هدف این پژوهش، مدل‌سازی ریاضی شبکه تأمین درهم آمیخته سه‌سطحی (شامل تأمین‌کننده، تولیدکننده، مشتریان) با محوریت تاب‌آوری است. روش این پژوهش، از نوع بنیادی کاربردی است. رویکرد آن از نوع کمی و از نوع مدل‌سازی ریاضی است. در این تحقیق، ابتدا مسأله مدل‌سازی می‌شود و با استفاده از داده‌های واقعی، در نرم‌افزار GAMS حل شده و پس از تعیین مقادیر بهینه متغیرهای تصمیم، نتایج آن تحلیل گردیده است. همچنین، روی پارامتر مؤثر (ظرفیت تولید) تحلیل حساسیت انجام شده است. نتایج نشان داد افزایش پارامتر ظرفیت به دلیل ثابت بودن تقاضا و کمتر بودن تقاضا از ظرفیت تولید تأثیری بر اهداف شبکه نداشت. مدل پیشنهادی ضمن بهینه‌سازی شبکه‌های تأمین درهم آمیخته، قادر است تاب‌آوری شبکه را نیز در مقابل اختلال تقویت کند. از سوی دیگر، کارایی رویکرد پیشنهادی از طریق به‌کارگیری آن در مطالعه موردی شبکه تأمین درهم آمیخته کاشی و سرامیک نشان داده شده است.

تاریخچه مقاله:

دریافت ۱۴۰۱/۱/۱۷

پذیرش ۱۴۰۱/۵/۱

(مقاله پژوهشی)

کلمات کلیدی:

شبکه تأمین درهم آمیخته

پویایی زنجیره تأمین

مدل‌سازی ریاضی

تاب‌آوری

بهینه‌سازی چندهدفه

۱. مقدمه

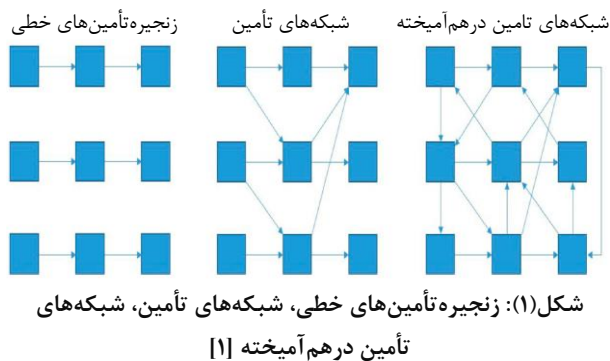
را در زمان کمبود عرضه کردند مانند شبکه تأمین خودرو و شبکه تأمین تجهیزات پزشکی که برای پاسخ‌گویی به تقاضای زیاد پیش آمده برای دستگاه‌های تنفس مصنوعی درهم آمیخته شدند [۲]. برخی از کارخانه‌ها و اتصالات‌های حمل‌ونقلی تحت این اختلال طولانی مدت جهانی از دسترس خارج شدند و با کمبود مواد و تأخیر در تحویل منجر به کاهش عملکرد صنایع از نظر درآمد، سطح خدمات و بهره‌وری شدند [۳]. نکته قابل تأمل چگونگی افزایش بقای زنجیره‌تأمین در مقابل اختلالات است تا از فروپاشی زنجیره‌تأمین خدمات و کالاها و بازار جلوگیری شود. بدین‌گونه مسأله بقای بازار و جامعه مطرح شده است. تجزیه و تحلیل مفهوم بقا در بازار در شرایط اختلال، ضرورت در نظر گرفتن بقا را در سیستم‌های پیچیده و زیرسیستم‌های جداگانه

سازمان‌ها و افراد با گذر زمان و با ورود به قرن بیست و یک در حال تجربه‌های جدیدی هستند. همه‌گیری ویروس کرونا تاب‌آوری زنجیره‌تأمین را تحت تأثیر و پیشرفت در تحقیقات تاب‌آوری زنجیره‌تأمین را مورد توجه قرار داده است. در این شرایط برای محصولات چون ماسک صورت، ضدعفونی‌کننده دست، اسپری ضدعفونی‌کننده، تقاضا به شدت افزایش یافت که عرضه‌کننده به کنار آمدن با آن نبود و برای زنجیره‌تأمین‌های دیگر چون صنعت خودرو، تقاضا و عرضه به شدت کاهش یافت که منجر به توقف تولید، خطر ورشکستگی و ضرورت حمایت‌های دولتی شد [۱]. همچنین در برخی مواقع شبکه‌های تأمین مختلف با هم ادغام شدند و محصولات حیاتی

* نویسنده مسئول: اکبر عالم تبریز

تلفن: ۰۲۱-۲۲۴۳۱۸۴۳، پست الکترونیکی: a-tabriz@sbu.ac.ir

بزرگترین صادرکننده این محصولات در غرب آسیا شناخته شود. در سال‌های اخیر صادرات کاشی و سرامیک یکی از مهم‌ترین دادوستدهای خارجی کشور شده است. بنابراین برای دستیابی به بخش بزرگتری از سهم صادرات، فضای رقابتی بر این صنعت حاکم شده است و با رشد این صنعت، چالش‌های گوناگونی که مدیران باید آن‌ها را مدیریت کنند در حال افزایش است. اهمیت و حساس بودن زنجیره تأمین کاشی در ایران و افزایش سریع هزینه‌های تولید و تأمین در آن، بسیاری از شرکت‌های این زنجیره را بر آن داشته است تا به دنبال کاهش هزینه‌ها باشند، از این رو شرکت‌ها همواره سعی در بهبود عملکرد شبکه تأمین دارند.



صنعت کاشی و سرامیک شامل تعداد زیاد تأمین‌کنندگان و صنایع وابسته به آن است که باعث پیچیدگی مدیریت تولید شده است. با نگاه به این صنایع می‌توان زنجیره‌های تأمین به هم پیوسته کاشی و سرامیک، لعاب، گلوله‌های سرامیکی را دید که شبکه تأمین این صنعت را تشکیل داده‌اند. تصمیماتی که در جهت حداکثر نمودن منافع کل شبکه اتخاذ می‌گردد، توانایی استفاده از منافع موجود را به اعضای شبکه می‌دهد تا به حداکثر کارایی دست یابند و خدمت‌دهی بهتری برای جامعه داشته باشند و بقای آن‌ها در بازار را تضمین می‌کند.

در ادامه تحقیق، ادبیات و پیشنهاد تحقیق در بخش دوم مورد بررسی قرار می‌گیرد. سپس در بخش سوم به تعریف پارامترها، متغیرهای تحقیق و در ادامه به تشریح ساختار مدل ریاضی سه‌سطحی شبکه تأمین درهم آمیخته پرداخته شده است. در بخش چهارم، مثال کاربردی در شبکه تأمین درهم آمیخته کاشی و سرامیک حل و اعتبارسنجی می‌شود و تحلیل حساسیت بر روی پارامتر مؤثر بر تابع هدف انجام می‌شود و در پایان بحث و نتیجه‌گیری انجام شد.

۲. پیشینه پژوهش

در این بخش با توجه به حیطه مسأله در نظر گرفته شده در این پژوهش، در زیربخش پیشینه نظری، مفهوم شبکه تأمین درهم آمیخته به همراه بررسی تاب‌آوری در طراحی شبکه تأمین درهم آمیخته مدنظر قرار گرفته است. در زیربخش پیشینه تجربی، حیطه بررسی مقالات گسترش یافته و مسائل طراحی شبکه زنجیره تأمین و شبکه تأمین درهم آمیخته با مفهوم تاب‌آوری بررسی می‌شوند. در انتها نیز به مقایسه

آن‌ها که به هم متصل‌اند را نشان می‌دهد [۱]. نمونه‌ای از سیستم‌های پیچیده را می‌توان شبکه‌های تأمین نام برد که شامل عناصر مستقل به هم پیوسته‌اند تا جریان کارها، کالاهای فیزیکی و اطلاعات مابین آن‌ها شکل گیرد. در دنیایی که به طرز فزاینده‌ای به هم پیوسته است، شبکه‌های تأمین فیزیکی، خدماتی و دیجیتالی به تدریج پیچیده‌تر، پویاتر و به یکدیگر وابسته‌تر می‌شوند، بنابراین شبکه تأمین بایستی توانایی مقابله بر اختلالات را داشته باشد [۴].

ادبیات مدیریت زنجیره تأمین، نوع جدیدی از شبکه‌های یکپارچه را در مفهومی خاص ارائه کرده است. اولین بار ایوانف و دولگوی (۲۰۲۰) [۱] اصطلاح "شبکه‌های تأمین درهم آمیخته" را معرفی کردند که شامل تمامی زنجیره‌های تأمین‌های به هم پیوسته است که در یکپارچگی این زنجیره‌های تأمین، امنیت جامعه و بازارها در کالاها و خدمات تضمین می‌شود. مانند ویروس کرونا که پیوندهای پیچیده و در برخی مواقع پیش‌بینی نشده را بین زنجیره‌های تأمین‌های صنعتی، بهداشتی، دارویی و غذایی ایجاد کرد [۵]. حتی قبل از همه‌گیری، همکاری بین زنجیره‌های تأمین غیرمرتبط سنتی در اقتصاد دایره‌ای، زنجیره‌های تأمین بشردوستانه و لوازم الکترونیکی رخ داده بود [۳]. مانند استفاده از هدررفت برخی فرآیندهای زنجیره تأمین در چندین زنجیره تأمین متقاطع به‌عنوان ورودی سایر زنجیره‌های تأمین دیگر [۶] و یا تعامل لجستیک‌های تجاری و بشردوستانه که چندین زنجیره تأمین از امکانات انبار به‌صورت مشترک استفاده می‌کنند [۷]. همچنین، صنعت ۴.۰ و تولید سایبری-فیزیکی به‌طور قابل توجهی زنجیره‌های تأمین‌ها را تغییر داده و درهم آمیختگی آن‌ها را افزایش داده است [۸].

شبکه‌های تأمین درهم آمیخته، مطابق با شکل (۱)، سیستم‌های باز با پویایی ساختاری هستند، زیرا شرکت‌ها در آن ممکن است رفتارهای مختلفی را با تغییر در نقش‌شان (خریدار-تأمین‌کننده) در زنجیره تأمین‌های به هم پیوسته یا زنجیره‌های رقابتی از خود نشان دهند و ساختارها، نقش‌ها و رفتارهای شرکت‌های درگیر تغییر می‌کند. به همین ترتیب، می‌توان نتیجه گرفت که بسیاری از زنجیره‌های تأمین بر اساس اصول توسعه ایجاد و تکامل به شبکه‌های تأمین درهم آمیخته تبدیل می‌شوند [۱]. این ساختارهای جدید، پویا و در حال تکامل، متفاوت از زنجیره‌های خطی با ساختارهای ایستا هستند و نیاز به بازنگری در برخی از مفاهیم سنتی دارند و تمرکز آن‌ها مربوط به مبحث بقا است [۵]. تجزیه و تحلیل بقا در سطح شبکه‌های تأمین درهم آمیخته نیاز به توجه بیشتر به تاب‌آوری در هر زنجیره تأمین درگیر در شبکه دارد [۱]. زیرا شبکه‌های پیچیده در برابر اختلالات شدید آسیب‌پذیرتر بوده به‌طوری‌که حتی ساختار زنجیره‌های چهار تغییر می‌دهند. این سازوکارها اصولاً با درک کلاسیک از زنجیره تأمین متفاوت هستند و نیازمند یک تفکر جدید در مورد تاب‌آوری است [۹]. صنعت کاشی و سرامیک یکی از مشاغل قدیمی ایرانیان است که در هر دوره‌ی تاریخی به اشکال متفاوت به کار گرفته شده است. ایران یکی از پنج کشور بزرگ تولیدکننده کاشی و سرامیک است که با دارا بودن ظرفیت بسیار زیاد در این صنعت توانسته است به‌عنوان

دهد تا تأمین کالاها و خدمات جامعه و بازارها را تضمین کند [۳]. در واکنش زنجیره‌تأمین به اختلالات در سطح تجزیه و تحلیل شبکه به شرح زیر و جدول (۱) تجزیه و تحلیل کرد [۱]:

- ثبات: توانایی بازگشت به حالت قبل از آشفتگی و اطمینان از دوام و استمرار
 - استواری: توانایی مقاومت در برابر اختلال (یا مجموعه‌ای از اختلالات) برای حفظ عملکرد برنامه‌ریزی شده
 - تاب‌آوری: توانایی مقاومت در برابر اختلال (یا مجموعه‌ای از اختلالات) و بازیابی عملکرد
- ثبات به‌عنوان "ویژگی اصلی مطلوب یک شبکه تأمین بدون در نظر گرفتن عملکرد" بیان می‌شود درحالی‌که استواری و تاب‌آوری، صریحاً شامل عملکرد در تجزیه و تحلیل تأثیرات اختلال است [۱۳]. همچنین استواری را می‌توان توانایی سیستم برای مقاومت در برابر اختلال (یا مجموعه‌ای از اختلالات) بدون هیچ‌گونه تغییرات/تطبیق‌های ساختاری و پارامتری تجزیه و تحلیل کرد، درحالی‌که تجزیه و تحلیل تاب‌آوری اجازه می‌دهد تا سیستم از برخی بازیابی/تطبیق به‌منظور بازگرداندن عملیات و عملکرد مختل شده استفاده کند [۱۴]. مطالعه پاولو و همکاران (۲۰۱۹) [۱۵] ویژگی‌های ساختاری زنجیره‌تأمین را به‌عنوان مهم‌ترین عامل تعیین‌کننده برای حفظ ثبات و استواری و دستیابی به تاب‌آوری تشخیص داده است. نکته قابل توجه دیگر در پژوهش‌ها، ارتباط پیچیدگی و تاب‌آوری زنجیره‌تأمین است [۱۶، ۱۷]. ایوانف و دولگوی (۲۰۱۹) [۹] تأکید می‌کنند که شبکه‌های پیچیده در برابر اختلالات شدید آسیب‌پذیرتر می‌شوند تا اینکه حتی ساختار زنجیره‌تأمین را تغییر می‌دهند.

جدول (۱): مفاهیم اصلی در واکنش زنجیره‌تأمین در برابر اختلالات

مفاهیم	آشفتنگی عملیاتی	اختلال در ساختار زنجیره‌تأمین	عملکرد خروجی بازیابی
ثبات	✓		
استواری	✓	✓	✓
تاب‌آوری		✓	✓

۲-۲. پیشینه تجربی

با بررسی و مذاقه پیشینه تجربی در حوزه طراحی شبکه زنجیره‌تأمین می‌توان پی‌برد بحث شبکه تأمین درهم‌آمیخته تاب‌آور در طراحی شبکه به‌ندرت مورد توجه پژوهشگران قرار گرفته است.

ایوانف و دولگوی (۲۰۲۰) [۱] با تمرکز بر شیوع ویروس کرونا، ضرورت در نظر گرفتن مانایی را در این شبکه دیدند و شکل‌گیری مانایی را از طریق مدل‌سازی نظریه بازی‌ها در یک سیستم بیولوژیکی شبیه به شبکه‌های تأمین درهم‌آمیخته نشان دادند و با تعیین میزان تولید و موجودی به افزایش بقا شبکه، کمک کردند.

فیض‌آبادی، گلیگور و چوی (۲۰۲۱) [۲] با دیدگاه جوری-ریگینگ، تاب‌آوری را در شبکه‌های تأمین درهم‌آمیخته ارزیابی کردند،

و تفاوت این پژوهش با پژوهش‌های مشابه در جدول (۲) پرداخته می‌شود و سهم این پژوهش در ادبیات موضوع تبیین می‌گردد.

۲-۱. پیشینه نظری

ایده‌های تشکیل زنجیره‌تأمین پویا اولین تحولات را در زمینه شرکت‌های مجازی و شبکه‌های مشترک ایجاد کرده‌اند [۱۰]. وانگ و همکاران (۲۰۱۸) [۱۱] مفهوم شبکه‌های زنجیره‌تأمین جامع‌نگر توسعه دادند که شامل گروهی از زنجیره‌تأمین‌های متقاطع به هم آمیخته است. کلی و مارچیز (۲۰۱۵) [۱۲] به "زنجیره‌های تأمین پیچیده، پویا و به هم پیوسته" اشاره کردند که از فناوری اطلاعات برای هم‌زمان‌سازی زنجیره‌تأمین‌ها در وب‌های ارزش در محیط‌های عملی به کار گرفته‌اند. به همین ترتیب، می‌توان نتیجه گرفت که بسیاری از زنجیره‌تأمین‌ها بر اساس اصول توسعه تکاملی به شبکه‌های تأمین درهم‌آمیخته تبدیل می‌شوند. شبکه‌های تأمین درهم‌آمیخته به‌عنوان شبکه‌های پیچیده تأمین است که در آن ساختارها، نقش‌ها و رفتارهای شرکت‌های درگیر در آن که به‌طور پویا تغییر می‌کند. همچنین در عمل، زنجیره‌تأمین‌ها معمولاً به‌طور مستقل عمل نمی‌کنند، بلکه در داخل و یا در سراسر بخش‌های تجاری گسترده و به هم متصل می‌شوند و اکوسیستم‌های تأمین یا شبکه‌های تأمین درهم‌آمیخته را تشکیل می‌دهند. برای اولین بار اصلاح شبکه‌های تأمین درهم‌آمیخته را ایوانف و دولگوی (۲۰۲۰) [۱] مطرح کردند. سه ویژگی اصلی که شبکه‌های تأمین درهم‌آمیخته را از شبکه‌های زنجیره‌تأمین جهت‌دار خطی با ساختارهای ایستا متمایز می‌کند:

- سیستم باز: اتصال بین صنایع در شبکه تأمین درهم‌آمیخته رایج است.
- پویایی ساختاری: شبکه‌های تأمین درهم‌آمیخته از ساختارهای مختلفی تشکیل شده‌اند که به هم مرتبط هستند و در پویایی خود تغییر می‌کنند مانند ساختارهای فناوری و فرآیندهای تجاری، سازمانی، فنی، توپولوژیکی، اطلاعاتی و مالی. همچنین همه شرکت‌کنندگان درگیر در شبکه‌های تأمین درهم‌آمیخته ممکن است رفتارهای متعددی از خود نشان دهند، مانند تغییر نقش خریدار-تأمین‌کننده در زنجیره‌تأمین‌های به هم پیوسته یا حتی رقیب، که ساختار شبکه را پویاتر و انعطاف‌پذیرتر می‌کند.
- یکپارچگی: شبکه‌های تأمین درهم‌آمیخته مجموعه‌ای از زنجیره‌تأمین‌های به هم پیوسته است که در یکپارچگی خود، ارائه خدمات یا محصولات جامعه و بازار را تضمین می‌کند (مانند خدمات غذایی یا خدمات ارتباطی).

همه‌گیری جهانی کرونا و فروپاشی زنجیره‌تأمین‌ها، شبکه‌های تأمین درهم‌آمیخته و مسائل مربوط به بقای بازار را به خط مقدم بحث‌های مدیریت ریسک تبدیل کرده است. شبکه‌های تأمین درهم‌آمیخته، در چشم‌انداز بلندمدت می‌تواند در مواقع اختلالات بلندمدت و جهانی با استفاده از تعدیل ظرفیت‌ها و تخصیص آن‌ها به تقاضاها، در پاسخ به تغییرات داخلی و خارجی به حیات خود ادامه

تولید سیمان، هیچ تأثیری بر تاب آوری شبکه زنجیره تأمین سیمان ندارد.

شیشه‌بری، عبدالعظیمی و عندلیب اردکانی (۱۴۰۰) [۲۰] مدلی برای شبکه توزیع دارو منطبق با شرایط وجود یک اپیدمی (بیماری‌های همه‌گیر مانند کرونا) برای زنجیره تأمین دارو ارائه دادند. با اضافه کردن مرکز تأمین‌کننده پشتیبان سعی شد تا علاوه بر مدیریت نمودن تأثیرهای منفی بیماری کرونا، آثار آن نیز به صورت جامع بررسی شود.

۲-۳. تبیین شکاف تحقیقاتی

خلاصه برخی از مهم‌ترین مطالعاتی که در سال‌های اخیر بر روی زنجیره تأمین تاب‌آور و شبکه‌های تأمین درهم آمیخته انجام شده در جدول (۲) ارائه شده است. در تحقیقات معیارهای متنوعی برای ارزیابی شبکه و زنجیره تأمین مورد استفاده قرار گرفته‌اند. حداکثر کردن فروش به عنوان یک معیار کمی در بسیاری از مطالعات به کار رفته است. همچنین در مقایسه بعدهای تاب‌آوری در مدل‌سازی، ابعاد گره بحرانی و تقاضای برآورده نشده در پژوهش‌های کمتری مورد بررسی قرار گرفته است. همان‌طور که از مرور ادبیات موضوع مشاهده می‌شود، نسبت به تعداد مطالعات صورت گرفته در زنجیره تأمین تاب‌آور، بر روی مدیریت شبکه تأمین درهم آمیخته، مطالعات صورت گرفته اندک است و بهینه‌سازی مسائل این نوع شبکه تأمین کمتر مورد توجه بوده است

نتایج نشان داد که انطباق در شبکه‌های زنجیره تأمین با دیدگاه جوری-ریگینگ بیشتر از شبکه‌های زنجیره تأمین بدون دیدگاه جوری-ریگینگ است.

وانگ و یو (۲۰۲۱) [۳] شبکه تأمین درهم آمیخته تحت اختلالات حمل‌ونقلی با دیدگاه مانایی را طراحی کردند. آن‌ها با در نظر گرفتن راه‌های تأمین جدید برای بازارهای تقاضا، مدل انعطاف‌پذیر برای شبکه با اهداف مینیموم کردن هزینه و افزایش مانایی طراحی کردند. خلیلی و همکاران (۱۴۰۱) [۱۸] شبکه زنجیره تأمین پایدار و تاب‌آور تحت شرایط عدم قطعیت اختلال طراحی کردند که یک مدل چندهدفه احتمالی دومرحله‌ای مبتنی بر سناریو است که ریسک‌های اختلال در زنجیره را در قالب سناریوهای احتمالی در نظر می‌گیرد. اختلال‌های در نظر گرفته شده در این پژوهش عبارت‌اند از: اختلال در تأمین به دلیل تخریب ظرفیت تولید پالایشگاه‌ها، کاهش واردات بنزین تحت تأثیر فشارهای سیاسی، تخریب تسهیلات ذخیره‌سازی و افزایش ناگهانی تقاضای برخی از نقاط. مدل پیشنهادی ضمن بهینه‌سازی کمی هر سه بعد اقتصادی، اجتماعی و زیست‌محیطی شبکه زنجیره تأمین بنزین، قادر است تاب‌آوری شبکه را نیز در مقابل اختلال تقویت کند.

موسوی، جمالی و قربانپور (۱۴۰۰) [۱۹] مدل بهینه‌سازی شبکه زنجیره تأمین سبز-تاب‌آور ارائه کردند که در صنایع سیمان به کار گرفته شد. این مدل به منظور مقابله با اختلال‌های ناگهانی و به حداقل رساندن اثرهای زیست‌محیطی طراحی شد. نتایج نشان داد که مازاد

جدول (۲): خلاصه پژوهش‌های اخیر مرتبط با موضوع

نویسندگان و سال	اجزای زنجیره			شبکه		هدف	ابعاد تاب‌آوری					
	تأمین‌کنندگان	تولیدکنندگان	توزیع‌کنندگان	تأمین	تسهیل‌دهنده درهم آمیخته		استراتژیک	تاکتیکی و عملیاتی	چند دوره	تک دوره	روش حل	کاربرد
Mousazadeh et al. (2015) [21]	✓	✓				کاهش هزینه، کاهش تقاضای برآورده نشده	✓	✓	✓		دقیق	پزشکی و دارویی
Balaman and Selim (2016) [22]	✓	✓				برآورده کردن تقاضای مشتریان	✓	✓	✓		دقیق	عمومی
Cardoso et al. (2015) [23]	✓	✓				طراحی و برنامه‌ریزی زنجیره تأمین تاب‌آور	✓	✓		✓	دقیق	عمومی
Carvalho et al. (2012) [24]	✓	✓				ارزیابی سناریوهای تأمین زنجیره تأمین برای بهبود تاب‌آوری		✓	✓		شبیه‌سازی	خودرو

کاربرد	روش حل	زمان		تصمیمات		ابعاد تاب‌آوری	هدف	شبکه		اجزای زنجیره			نویسندگان و سال	
		تک دوره	چند دوره	تاکتیکی و عملیاتی	استراتژیک			تأمین در هم آمیخته	تأمین	توزیع کنندگان	تولید کنندگان	تأمین کنندگان		
عمومی	الگوریتم تکامل فاضلی	✓		✓		سناریو بر اساس اختلال	تصمیم‌گیری در مورد تأمین‌کنندگان تاب‌آور					✓	Torabi et al. (2015) [25]	
پوشاک	دقیق	✓			✓	سناریو بر اساس اختلال	بررسی رابطه پایداری و تاب‌آوری در طراحی زنجیره تأمین				✓	✓	✓	Fahimnia and Jabbarzadeh (2016) [26]
پزشکی و دارویی	الگوریتم DVG		✓	✓	✓	گره بحرانی، تخصیص تأمین‌کننده، پیچیدگی جریان، پیچیدگی گره، برآورد تقاضا	افزایش تاب‌آوری و پایداری و کاهش هزینه‌ها				✓	✓		Zahiri et al (2017) [27]
نفت و گاز طبیعی	دقیق		✓	✓	✓	سطح خدمات گاز (تطبیق) و جریمه به‌کارگیری ظرفیت نامطلوب تجهیزات یا همان برگشت به سطح مطلوب (بازآوری)	افزایش تاب‌آوری و پایداری و کاهش هزینه‌ها				✓	✓	✓	زمانیان (۱۳۹۹)، [۲۸]
نیروگاه برق	شبیه‌سازی		✓	✓		برآورد تقاضا، سناریو بر اساس اختلال	افزایش تاب‌آوری، کاهش هزینه		✓		✓	✓	✓	Tsao et al. (2021) [29]
بیولوژیک	نظریه بازی‌ها		✓	✓			افزایش بقا و مانایی	✓				✓	✓	Ivanov, Dolgui, (2020) [1]
دستگاه تنفس مصنوعی	شبیه‌سازی		✓	✓	✓		افزایش بقا و مانایی	✓			✓	✓	✓	Feizabadi, Gligor, choi (2021) [2]
عمومی	فرآیندکاری		✓	✓	✓	برآورد تقاضا، سناریو بر اساس اختلال	افزایش بقا و مانایی و کاهش هزینه	✓				✓	✓	Wang, Yao [3] (۲۰۲۱)
عمومی	دقیق		✓	✓		گره بحرانی، برآورد تقاضا	کاهش هزینه، افزایش تاب‌آوری	✓				✓	✓	مقاله حاضر

۳. روش‌شناسی پژوهش

به مقطعی از زمان می‌پردازد. واحد تحلیل در این مطالعه، شرکت کاشی و سرامیک، شرکت لعاب‌سازی و شرکت گلوله‌سازی آلومینا است. این پژوهش از روش مدل‌سازی ریاضی که در آن یک مدل

پژوهش حاضر از نظر هدف، در زمره پژوهش‌های بنیادی کاربردی و از نظر نوع داده‌ها، پژوهش کمی است که به بررسی داده‌های مرتبط

۲. همه‌ی مراکز تولید دارای ظرفیت هستند.
۳. هر تولیدکننده می‌تواند روابط عمودی با دیگر تولیدکننده‌ها و روابط روبه جلو با مشتریان داشته باشد.
۴. مشتریان، مشتریان نهایی و یا نمایندگان فروش هستند.

۴-۱. مدل ریاضی

در این بخش یک مدل برنامه‌ریزی خطی برای شبکه تأمین درهم‌آمیخته فرموله می‌شود. مجموعه‌ها، پارامترها و متغیرهای تصمیمی که در مدل سازی استفاده می‌شوند، به صورت زیر تعریف می‌شوند.

اندیس‌ها:

I	اندیس تأمین‌کنندگان
J & N	اندیس مراکز تولید
K	اندیس مشتریان
R	اندیس مواد خام تأمین‌کنندگان
P & F	اندیس محصولات مراکز تولید
T	اندیس دوره‌های زمانی

متغیرهای تصمیم:

مقدار ماده خام r که از تأمین‌کننده i به مرکز تولید j در دوره زمانی t منتقل می‌شود.	x_{ijr}^t
مقدار محصول p که از مرکز تولید j به مشتری k در دوره زمانی t منتقل می‌شود.	y_{jkp}^t
مقدار محصول p که از مرکز تولید j به مرکز تولید n در دوره زمانی t منتقل می‌شود.	y_{jnp}^t
مقدار تولید محصول p در مرکز تولید j در دوره زمانی t	q_{jp}^t
مقدار انبار محصول p در مرکز تولید j در دوره زمانی t	I_{jp}^t
برابر با یک است اگر متغیر x_{ijr}^t در دوره زمانی t بزرگتر از صفر باشد، در غیر این صورت صفر	$x1_{ijr}^t$
برابر با یک است اگر متغیر y_{jkp}^t در دوره زمانی t بزرگتر از صفر باشد، در غیر این صورت صفر	$y1_{jkp}^t$
برابر با یک است اگر متغیر y_{jnp}^t در دوره زمانی t بزرگتر از صفر باشد، در غیر این صورت صفر	$y1_{jnp}^t$
برابر با یک است اگر مرکز تولید j در دوره زمانی t بحرانی است، در غیر این صورت صفر	g_{jt}

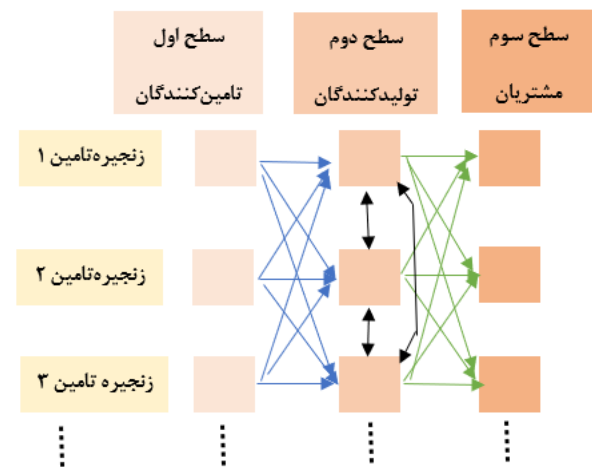
پارامترها:

هزینه تولید هر واحد از محصول p در مرکز تولید j	cq_{jp}
هزینه انبارداری هر واحد از محصول p در مرکز تولید j	ch_{jp}
هزینه حمل هر واحد ماده خام r که از تأمین‌کننده i به مرکز تولید j منتقل می‌شود.	cts_{ijr}
هزینه حمل هر واحد محصول p که از مرکز تولید j به مشتری k منتقل می‌شود.	ctm_{jkp}
هزینه حمل هر واحد محصول p که از مرکز تولید j	ctm'_{jnp}

بهبه‌سازی دوهدفه مخلوط عدد صحیح با چندین محدودیت برای طراحی شبکه تأمین درهم‌آمیخته سه‌مرحله‌ای تاب‌آور توسعه داده شده است، بهره‌م‌برد. در این مطالعه از روش کتابخانه‌ای و براساس مطالعه و مذاکره میزانی نظری و تجربی در طراحی مدل پژوهش استفاده گردید. سپس از طراحی و توسعه مدل، اعتبارسنجی انجام پذیرفت و جواب بهینه مدل در اختیار کارشناسان و مدیران قرار داده شد. سپس، از آن‌ان خواسته شد تا نتایج را با داده‌های واقعی مقایسه نمایند.

۴. مدل شبکه تأمین درهم‌آمیخته پیشنهادی

در این تحقیق شبکه تأمین درهم‌آمیخته سه سطحی تاب‌آور مورد بررسی قرار خواهد گرفت که این سطوح عبارتند از: تأمین‌کنندگان مواد اولیه، تولیدکنندگان و مشتریان. با به‌کارگیری مدلی که ارائه خواهد گردید می‌توان تصمیمات مربوط به مدیریت شبکه تأمین درهم‌آمیخته مانند میزان جریان مواد، تولید و ذخیره سازی را به صورت هماهنگ با یکدیگر در کل شبکه اتخاذ نمود. هدف افزایش سود و عدم تاب‌آوری شبکه با تعیین میزان تولید و موجودی در هر مرکز تولید و میزان حمل و نقل در بین گره‌ها می‌تواند دید. ابعاد در نظر گرفته شده برای تاب‌آوری گره بحرانی و تقاضای برآورده شده است. شبکه تأمین درهم‌آمیخته سه‌مرحله‌ای در نظر گرفته شده در این مقاله به صورت شماتیک در شکل (۲) نمایش داده شده است که دارای روابط عمودی میان مراکز تولید است. به دلیل اینکه هر مرکز تولید می‌تواند علاوه بر نقش تولیدکننده دارای نقش تأمین‌کننده در سطح دوم باشد پس شبکه را می‌توان جزء شبکه تأمین درهم‌آمیخته در نظر گرفت.



شکل (۲): شبکه تأمین درهم‌آمیخته سه‌سطحی دارای روابط میان سطح دوم مراکز تولید (نقش خریدار-تأمین‌کننده)

مفروضات مسأله به شرح زیر است:

۱. تصمیمات تاکتیکی به صورت پویا در نظر گرفته می‌شود، به گونه‌ای که یک تصمیم مشخص از دوره‌ای به دوره دیگر می‌تواند متفاوت باشد.

$$I_{jp}^t \leq \text{caph}_{jpt}, \quad \forall j, p, t, \quad (۴)$$

$$\sum_{j=1}^J x_{ijr}^t \leq \text{UBs}_{irt}, \quad \forall i, r, t, \quad (۵)$$

$$\sum_{k=1}^K y_{jkp}^t + \sum_{n=1}^N y_{jnp}^t \leq \text{UB}_{jpt}, \quad \forall j, p, t, \quad (۶)$$

$$\sum_{i=1}^I x_{ijr}^t \geq q_{jp}^t z_{xjrp}, \quad \forall j, r, p, t, \quad (۷)$$

$$\sum_{n=1}^N y_{jnp}^t \geq q_{jf}^t z_{y'jpf}, \quad \forall j, p, f, t, \quad (۸)$$

$$\sum_{j=1}^J y_{jkp}^t \leq D_{kp}^t \quad \forall k, p, t, \quad (۹)$$

$$I_{jp}^t = I_{jp}^{t-1} + q_{jp}^t - \sum_{k=1}^K y_{jkp}^t - \sum_{n=1}^N y_{jnp}^t, \quad \forall j, p, t, \quad (۱۰)$$

$$x_{ijr}^t \geq 0, \quad y_{jkp}^t \geq 0, \quad y_{jnp}^t \geq 0, \quad q_{jp}^t \geq 0, \quad I_{jp}^t \geq 0, \quad (۱۱)$$

$$g_{jt} = 1 \mid \sum x_{ijr}^t + \sum y_{njp}^t + \sum y_{jkp}^t + \sum y_{jnp}^t > U_j^t, \quad \forall j, t, \quad (۱۲)$$

$$g_{jt} \in \{0, 1\}, \quad (۱۳)$$

در این بخش یک مدل شبکه تأمین درهم‌آمیخته سه‌سطحی به صورت یک مدل برنامه‌ریزی مخلوط عدد صحیح ارائه شده است. هدف در این مدل بیشینه کردن سود کل شبکه است که شامل تفاضل فروش با هزینه‌های تولید و حمل‌ونقل و انبارداری است که در رابطه (۱) آورده شده است. هدف دوم شامل کمینه کردن عدم تاب‌آوری با در نظر گرفتن گره بحرانی و عدم تقاضای برآورده شده است که در رابطه (۲) آورده شده است.

رابطه‌های (۳) و (۴) به ترتیب مربوط به محدودیت ظرفیت تولید و انبار هر مرکز تولید است که می‌بایست میزان تولید و میزان انبار در هر مرکز تولید از ظرفیت تولید و ظرفیت انبار هر مرکز کمتر باشد. رابطه‌های (۵) و (۶) به ترتیب مربوط به تعیین محصولات هر گره تأمین‌کننده و هر گره تولیدکننده است که نشان‌دهنده خروجی هر گره در هر محصول است. رابطه‌های (۷) و (۸) محدودیت توازن جریان است که می‌بایست ورودی هر گره تولیدکننده که شامل دو ورودی از تأمین‌کننده‌ها و دیگر مراکز تولید در همان سطح است بیشتر از میزان موردنیاز آن ماده خام یا محصول برای مقدار تولید تعیین شده باشد. رابطه (۹) محدودیت تقاضا است که تقاضای مشتری بزرگتر یا مساوی میزان جابجایی تمامی مراکز تولید به هر مشتری است. رابطه (۱۰) محدودیت تعیین میزان انبار در هر دوره زمانی و رابطه (۱۱) مربوط به متغیرهای تصمیم مثبت است.

رابطه (۱۲) نشان‌دهنده گره بحرانی در شبکه است، هر زمان که میزان جریان ورود و خروج یک شبکه بیشتر از مقدار معین شد، آنگاه آن گره بحرانی است و هر چه تعداد گره بحرانی در کل شبکه بیشتر باشد آنگاه شبکه تاب‌آوری کمتری دارد. همچنین رابطه (۱۶) متغیر عدد صحیح را نشان می‌دهد.

۲-۴. خطی‌سازی

خطی‌سازی رابطه (۱۲) با رابطه‌های (۱۴) و (۱۵) نشان داده شده است. (M عدد بسیار بزرگ است)

$$\left(\sum_{t=1}^T \sum_{i=1}^I \sum_{r=1}^R \sum_{j=1}^J x_{ijr}^t \right) * z_{xjrp} + \quad (۱۴)$$

به مرکز تولید n منتقل می‌شود. هزینه از دست دادن تقاضا به‌ازای هر واحد محصول p در مشتری k
 ماکزیمم سطح ظرفیت مرکز تولید z به‌ازای هر واحد از محصول p در دوره زمانی t
 ماکزیمم سطح ظرفیت انبار هر مرکز تولید z به‌ازای هر واحد از محصول p در دوره زمانی t
 حدبالای خروجی های هر مرکز تولید z به‌ازای هر واحد از محصول p در دوره زمانی t
 حدبالای خروجی های هر تأمین‌کننده i به‌ازای هر واحد از محصول r در دوره زمانی t
 مقدار تقاضای مشتری k برای محصول p در دوره زمانی t
 ضریب تبدیل هر واحد ماده خام r برای هر واحد محصول p در مرکز تولید z
 ضریب تبدیل هر واحد محصول p برای هر واحد محصول f در مرکز تولید z
 مقدار انبار محصول P در مرکز تولید z در هر دوره زمانی t
 ضریب پنالتی برای گره بحرانی
 ضریب پنالتی برای تقاضای مشتری برآورده نشده
 قیمت محصول p از مرکز تولید z به مشتری k در دوره زمانی t
 مقدار آستانه خروج و ورود در گره مرکز تولید z در دوره زمانی t
 ضریب تبدیل برای محصول p برای مرکز تولید z
 ضریب تبدیل برای محصول r برای مرکز تولید z

ضریب تبدیل هر واحد ماده خام r برای هر واحد محصول p در مرکز تولید z

ضریب تبدیل هر واحد محصول p برای هر واحد محصول f در مرکز تولید z

مقدار انبار محصول P در مرکز تولید z در هر دوره زمانی t

ضریب پنالتی برای گره بحرانی

ضریب پنالتی برای تقاضای مشتری برآورده نشده

قیمت محصول p از مرکز تولید z به مشتری k در دوره زمانی t

مقدار آستانه خروج و ورود در گره مرکز تولید z در دوره زمانی t

ضریب تبدیل برای محصول p برای مرکز تولید z

ضریب تبدیل برای محصول r برای مرکز تولید z

باتوجه به تعریف نمادها، مدل مسأله به صورت زیر ارائه می‌گردد که شامل هدف افزایش سود (رابطه (۱)) و کمینه کردن عدم تاب‌آوری (رابطه (۲)) و محدودیت‌های مرتبط با هدف اول (رابطه‌های (۳)-(۱۱)) و محدودیت‌های مرتبط با هدف دوم (رابطه‌های (۱۲) و (۱۳)) می‌باشد.

$$\text{Max } Z_1 = \sum_{t=1}^T \sum_{p=1}^P \sum_{k=1}^K \sum_{j=1}^J c_{jkpt} y_{jkp}^t - \left[\sum_{t=1}^T \sum_{p=1}^P \sum_{j=1}^J c_{qjp} q_{jp}^t + \sum_{t=1}^T \sum_{i=1}^I \sum_{r=1}^R \sum_{j=1}^J c_{tsijr} x_{ijr}^t + \sum_{t=1}^T \sum_{p=1}^P \sum_{k=1}^K \sum_{j=1}^J c_{tmjpk} y_{jkp}^t + \sum_{t=1}^T \sum_{p=1}^P \sum_{n=1}^N \sum_{j=1}^J c_{tmjnp} y_{jnp}^t + \sum_{t=1}^T \sum_{p=1}^P \sum_{j=1}^J c_{hjp} I_{jp}^t \right] \quad (۱)$$

$$\text{Min } Z_2 = \left(\sum_{t=1}^T \sum_{j=1}^J \alpha g_{jt} \right) + \left(\sum_{t=1}^T \sum_{p=1}^P \sum_{k=1}^K \sum_{j=1}^J \beta \left(D_{kp}^t - \sum_{j=1}^J y_{jkp}^t \right) / D_{kp}^t \right) \quad (۲)$$

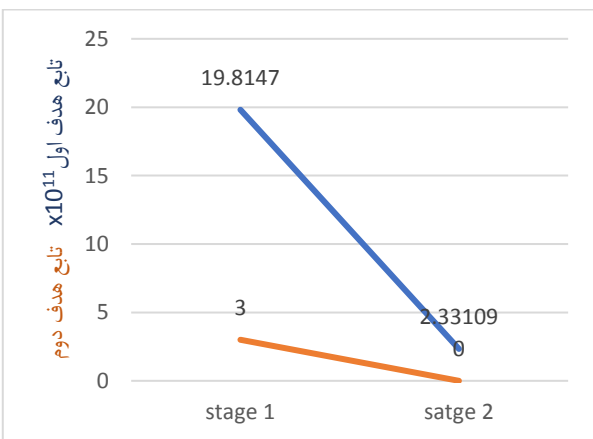
$$q_{jp}^t \leq \text{cap}_{jpt}, \quad \forall j, p, t, \quad D_{kp}^t \quad (۳)$$

خبرگان و مدیران صنعت کاشی و سرامیک، اولویت بیشینه کردن سود (تابع هدف اول) بیشتر از کمینه کردن عدم تاب آوری (تابع هدف دوم) بوده، بنابراین مسأله در ابتدا با تابع هدف اول حل شده و پس از آن مقدار بهینه را برابر با تابع هدف اول قرار داده و بعد از آن مقدار بهینه تابع هدف دوم به دست آمده است.

داده‌های مربوطه مسأله در جدول (۳) و نتایج برنامه‌ریزی شبکه تأمین درهم آمیخته در جدول (۴) برای شبکه تأمین کاشی و سرامیک ارائه شده است. همان‌طور که از نتایج پیداست مدل هزینه بیشتری را برای داشتن تاب آوری بیشتر، متحمل می‌شود و تضاد بین اهداف کاملاً مشخص است. با تغییر ضرایب پنالتی آلفا (هزینه گره بحرانی) و بتا (هزینه برای تقاضای برآورده نشده) می‌توان جواب‌های متفاوت از مدل گرفت. اگر ضریب بتا رو بیشتر بگیریم تمایل مدل برای برآورده شدن تقاضا بیشتر را خواهد بود ولی اگر ضریب آلفا رو مقدار بیشتر بدهیم تمایل شبکه برای نداشتن گره بحرانی بیشتر می‌شود و تقاضای کمتری را پاسخ خواهد گفت.

از نتایج مدل می‌توان فهمید که میزان مقدار پارامتر U_j^t (حد بالای مجموع میزان ورود و خروج گره مراکز تولید) اهمیت بسیار دارد زیرا بعد گره بحرانی در تابع هدف دوم بر اساس این پارامتر گره بحرانی را مشخص می‌کند. همان‌طور که در جدول (۴) مشخص است مدل برای اینکه بتواند گره بحرانی تشکیل ندهد تقاضا را طوری پاسخ می‌دهد که مجموع ورودی و خروجی هر گره مرکز تولید کمتر از پارامتر U_j^t شود. اگر میزان پارامتر U_j^t را نیز خیلی بزرگ بگیریم آنگاه گره بحرانی تشکیل نمی‌شود بنابراین مدل به سمت پاسخ‌گویی هرچه بیشتر تقاضا خواهد رفت. بنابراین در قسمت بعد، تحلیل حساسیت، بر روی نتایج بحث شده صورت خواهد گرفت.

در جدول (۵) و شکل (۴) می‌توان تغییرات جواب‌های توابع اهداف را مشاهده کرد، زمانی که تابع هدف دوم به‌عنوان اولویت دوم وارد می‌شود سود با درصد تغییر ۰/۸۸ درصد کاهش می‌یابد تا به میزان ۰/۱۲۵ درصد تاب آوری شبکه افزایش پیدا کند. همان‌طور که پیشتر بحث شد می‌توان با تغییر پارامترهای آلفا و بتا و U_j^t به پاسخ‌گویی بیشتر تقاضا و افزایش سود شبکه پرداخته شود که با منطق مدل نیز کاملاً هماهنگ است.



شکل (۴): تغییرات تابع هدف اول و دوم

$$\sum_{t=1}^T \sum_{p=1}^P \sum_{k=1}^K \sum_{j=1}^J y'_{jnp}{}^t + (\sum_{t=1}^T \sum_{p=1}^P \sum_{n=1}^N \sum_{j=1}^J y'_{njp}{}^t) * zy'_{jp} \leq U_j^t$$

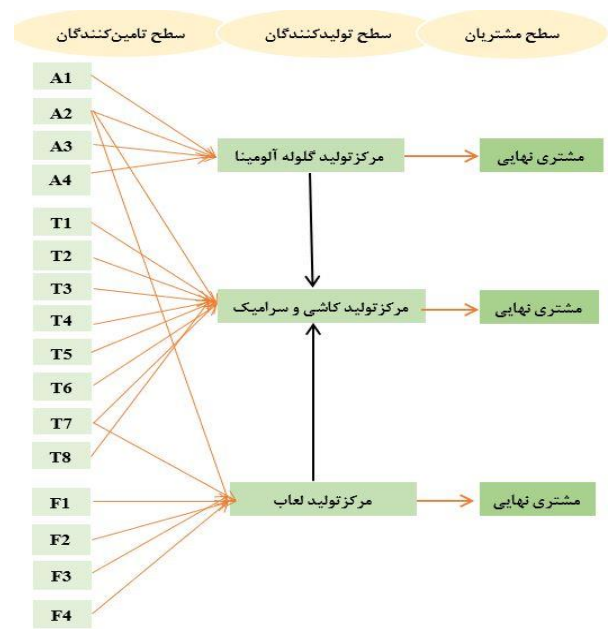
$$*(1-g_{jt}) + M * g_{jt}$$

$$(\sum_{t=1}^T \sum_{i=1}^I \sum_{r=1}^R \sum_{j=1}^J x_{ijr}{}^t) * zx_{jr} + \sum_{t=1}^T \sum_{p=1}^P \sum_{k=1}^K \sum_{j=1}^J y'_{jnp}{}^t + (\sum_{t=1}^T \sum_{p=1}^P \sum_{n=1}^N \sum_{j=1}^J y'_{njp}{}^t) * zy'_{jp} \geq U_j^t$$

$$*(g_{jt}) \quad (15)$$

۵. یافته‌های پژوهش

جهت ارزیابی و آزمودن صحت و درستی مدل، یک مسأله شبکه تأمین کاشی و سرامیک با استفاده از نرم‌افزار GAMS حل شده که شامل سه زنجیره تأمین گلوله آلومینایی، لعاب‌سازی و کاشی و سرامیک است که مجموع تأمین‌کنندگان ۱۹ و مجموع مراکز تولید ۳ و مجموع مشتریان نهایی ۳ عدد و دوره زمانی دو سال در نظر گرفته شده است. هر کدام از این زنجیره تأمین‌ها گلوله آلومینایی، لعاب‌سازی و کاشی و سرامیک، مشتریان و تقاضای مربوطه خودشان را دارد. طبق تعریف شبکه‌های تأمین درهم آمیخته در تحقیق ایوانف و دولگوی (۲۰۲۰) [۱]، شرکت‌های درگیر در این شبکه مانند سیستم باز است، زیرا نقش و رفتارهای (تأمین‌کننده، خریدار) شرکت‌های درگیر در آن تغییر می‌کند (در سطح دوم تولیدکنندگان، شرکت‌های گلوله‌های سرامیکی و لعاب دارای نقش تأمین‌کننده نیز هستند). پس می‌توان شبکه تأمین صنعت کاشی و سرامیک را به‌صورت شبکه تأمین درهم آمیخته در نظر گرفت که به‌صورت شماتیک در شکل (۳) نمایش داده شده است.



شکل (۳): گراف شبکه تأمین درهم آمیخته کاشی و سرامیک

امروزه، تصمیم‌گیرندگان اغلب مجبورند با اهداف مختلفی که در تضاد با یکدیگر هستند، کنار بیایند. به‌طور کلی، مسائل چندهدفه را می‌توان با روش‌های مختلفی حل کرد. روش رایج در مقالات و پژوهش‌های پیشین، روش الویت مطلق است. بر اساس مصاحبه با

جدول (۳): داده‌های مسأله

پارامتر	مقدار	پارامتر	مقدار	پارامتر	مقدار	پارامتر	مقدار
cap _{1at}	۶۴۰۰۰۰۰	ch _{1a}	۳۵۰۰	cund _{1a}	۵۰۰۰۰۰	ctm' _{12a}	۱۰۰۰۰
cap _{2Tt}	۲۰۰۰۰۰۰	ch _{2T}	۳۵۰۰	cund _{2T}	۱۲۰۰۰۰۰	ctm' _{32f}	۱۰۰۰۰
cap _{3ft}	۷۷۰۰۰۰۰	ch _{3f}	۵۶۰	cund _{3f}	۵۰۰۰۰۰	ZY' _{2aT}	۰/۰۴۵۳۶
cq _{1a}	۳۵۰۰۰	caph _{1at}	۱۵۰۰۰۰۰	D _{2T} ^t	۲۰۰۰۰۰۰	ZY' _{2fT}	۰/۲۸۵۶
cq _{2T}	۳۵۰۰۰	caph _{2Tt}	۵۰۰۰۰۰۰	II _{jp} ^t	.	ZX _{1a1a}	۰/۹
cq _{3f}	۵۶۰۰	caph _{3ft}	۱۵۰۰۰۰۰	UB _{jpt}	۱۰۰۰۰۰۰۰۰	ZX _{1a2a}	۰/۰۲
ZX _{1a3a}	۰/۰۵	ZX _{1a4a}	۰/۰۳	ZX _{2t1T}	۴/۲	ZX _{2t2T}	۲/۱
ZX _{2t3T}	۹/۵۶۷۶	ZX _{2t4T}	۴/۳۷۶۴	ZX _{2t5T}	۰/۰۸۴	ZX _{2t6T}	۰/۰۸۴
ZX _{2t7T}	۰/۱۶۸	ZX _{2t8T}	۰/۰۰۵۰۴	ZX _{2a2T}	۰/۰۸۴	ZX _{3a2f}	۰/۴
ZX _{3t7f}	۰/۱۷	ZX _{3f1f}	۰/۰۸	ZX _{3f2f}	۰/۱۵	ZX _{3f3f}	۰/۰۳
ZX _{3f4f}	۰/۱۷	ctm _{jkp}	۲۰۰۰۰۰	cts _{11a1}	۲۰۰۰۰۰	cts _{21a2}	۱۲۰۰۰۰
cts _{31a3}	۹۰۰۰۰	cts _{41a4}	۴۵۰۰۰	cts _{52t1}	۲۵۰۰۰	cts _{62t2}	۲۵۰۰۰
cts _{72t3}	۴۵۰۰۰	cts _{82t4}	۴۵۰۰۰	cts _{92t5}	۲۵۰۰۰	cts _{22a2}	۱۲۰۰۰۰
cts _{102t6}	۲۵۰۰۰	cts _{112t7}	۲۰۰۰۰۰	cts _{122t8}	۹۰۰۰۰	cts _{23a2}	۱۲۰۰۰۰
cts _{113t7}	۲۰۰۰۰۰	cts _{133f1}	۳۰۰۰۰۰	cts _{143f2}	۳۰۰۰۰۰	cts _{153f3}	۳۰۰۰۰۰
UB _{sirt}	۱۰۰۰۰۰۰۰۰	cts _{163f4}	۳۰۰۰۰۰	α	۰/۵	β	۰/۵
U _j ^t	۱۰۰۰۰۰۰۰	D _{3f} ^t	۷۱۲۸۸۰۰	D _{1a} ^t	۶۳۰۹۲۸۰		

جدول (۴): خروجی مدل (مقادیر متغیرهای تصمیم)

متغیر	مقادیر	متغیر	مقادیر	متغیر	مقادیر	متغیر	مقادیر
X _{11a1} ⁹⁰	۴۵۰۰۰۰	X _{62t2} ⁹⁰	۱۵۷۵۳۱۵	X _{122t8} ⁹⁰	۳۷۸۰	q _{1al} ⁹⁰	۵۰۰۰۰۰
X _{11a1} ⁹¹	۴۵۰۰۰۰	X _{62t2} ⁹¹	۵۲۵۱۰۵	X _{122t8} ⁹¹	۱۲۶۰	q _{1al} ⁹¹	۵۰۰۰۰۰
X _{21a2} ⁹⁰	۱۰۰۰۰	X _{72t3} ⁹⁰	۷۱۷۷۱۳۵	X _{133f1} ⁹⁰	۴۰۰۰۰	q _{2ti} ⁹⁰	۷۵۰۱۵۰
X _{21a2} ⁹¹	۱۰۰۰۰	X _{72t3} ⁹¹	۲۳۹۲۳۷۸	X _{133f1} ⁹¹	۴۰۰۰۰	q _{2ti} ⁹¹	۲۵۰۰۵۰
X _{22a2} ⁹⁰	۶۳۰۱۲	X _{82t4} ⁹⁰	۳۲۸۲۹۵۶	X _{143f2} ⁹⁰	۷۵۰۰۰	q _{3fe} ⁹⁰	۵۰۰۰۰۰
X _{22a2} ⁹¹	۶۳۰۱۲	X _{82t4} ⁹¹	۱۰۹۴۳۱۸	X _{143f2} ⁹¹	۷۵۰۰۰	q _{3fe} ⁹¹	۵۰۰۰۰۰
X _{23a2} ⁹⁰	۲۰۰۰۰۰	X _{92t5} ⁹⁰	۶۳۰۱۲	X _{153f3} ⁹⁰	۱۵۰۰۰	I _{2ti} ⁹⁰	۵۰۰۰۰۰
X _{23a2} ⁹¹	۲۰۰۰۰۰	X _{92t5} ⁹¹	۲۱۰۰۴	X _{153f3} ⁹¹	۱۵۰۰۰	y _{11al} ⁹⁰	۵۰۰۰۰۰
X _{31a3} ⁹⁰	۲۵۰۰۰	X _{102t6} ⁹⁰	۶۳۰۱۲	X _{163f4} ⁹⁰	۸۵۰۰۰	y _{11al} ⁹¹	۵۰۰۰۰۰
X _{31a3} ⁹¹	۲۵۰۰۰	X _{102t6} ⁹¹	۲۱۰۰۴	X _{163f4} ⁹¹	۸۵۰۰۰	y _{22ti} ⁹⁰	۷۵۰۱۵۰
X _{41a4} ⁹⁰	۱۵۰۰۰	X _{112t7} ⁹⁰	۱۲۶۰۲۵	y _{12al} ⁹¹	۳۴۰۲۶	y _{22ti} ⁹¹	۲۵۰۰۵۰
X _{41a4} ⁹¹	۱۵۰۰۰	X _{112t7} ⁹¹	۴۲۰۰۸	y _{12al} ⁹⁰	۱۱۳۴۲	y _{33fe} ⁹⁰	۵۰۰۰۰۰
X _{52t1} ⁹⁰	۳۱۵۰۶۳۰	X _{113t7} ⁹⁰	۸۵۰۰۰	y _{32fe} ⁹⁰	۲۱۴۲۴۲	y _{33fe} ⁹⁰	۵۰۰۰۰۰
X _{52t1} ⁹¹	۱۰۵۰۲۱۰	X _{113t7} ⁹¹	۸۵۰۰۰	y _{32fe} ⁹¹	۷۱۴۱۴	g _{jt}	.
Z ₂				۲/۶۲۴			

۶. تحلیل حساسیت

باتوجه به آزمون عددی انجام شده، در این بخش بر روی پارامتر اصلی مؤثر بر کل شبکه تأمین درهم‌آمیخته، پارامتر ظرفیت تولید تحلیل حساسیت انجام خواهد شد. شکل (۵) و جدول (۶) تغییرات تابع هدف اول و دوم شبکه را برحسب تغییرات پارامتر ظرفیت تولید (تغییرات ظرفیت تولید برای سه زنجیره‌تأمین گلوله آلومینایی و کاشی و سرامیک و لعاب در شبکه تأمین درهم‌آمیخته کاشی و سرامیک) نشان می‌دهد. همان‌طور که در شکل (۵) پیداست چون ظرفیت تولید بیشتر

جدول (۵): تغییرات توابع اهداف

توابع هدف	الویت	مقادیر اهداف با الویت تابع هدف اول	مقادیر اهداف نهایی	درصد تغییرات
ماکزیمم کردن سود مینیمم کردن عدم تاب‌آوری	اول	۱۹۸۱۴۷*۱۰ ^۷	۲۳۳۱۰۹*۱۰ ^۶	-۰/۸۸
	دوم	۳	۲/۶۲۴	+۰/۱۲۵

نیاز به در نظر گرفتن و توجه زیاد به تاب آوری در هر زنجیره تأمین درگیر در شبکه را دارد. لذا مدل سازی شبکه تأمین درهم آمیخته با محوریت تاب آوری ضروری و لازم است. در این تحقیق به منظور افزایش سود و افزایش تاب آوری، یک مدل ریاضی دوهدفه سه سطحی برای شبکه تأمین درهم آمیخته بهینه ارائه گردید به طوری که در تحقیقات ایوانف و دولگوی (۲۰۲۰) و فیض آبادی، گلیگور و چوی (۲۰۲۱) مدل سازی بهینه شبکه تأمین در هم آمیخته ارائه نشده است. هدف مدل این پژوهش افزایش سود شبکه که شامل تفاضل فروش و هزینه های تولید و انبار و حمل و نقل و کمینه کردن عدم تاب آوری که شامل گره بحرانی و برآورد تقاضا است که در تحقیقات پیشین دیده نمی شود. به کارگیری و حل مدل ارائه شده در یک مطالعه موردی شبکه تأمین درهم آمیخته کاشی و سرامیک نشان داده شد. همچنین پارامتر مؤثر در اهداف شبکه، مانند ظرفیت تولید نیز مورد تحلیل حساسیت قرار گرفت. افزایش پارامتر ظرفیت به دلیل ثابت بودن تقاضا و کم تر بودن تقاضا از ظرفیت تولید تأثیری بر اهداف شبکه نداشت. همچنین تأثیرات پارامترهای تقاضا، قیمت فروش و حد معین مجموع ورود و خروج گره مراکز تولید بر روی توابع هدف نیز بررسی شد که بیشترین تأثیر را پارامتر حد معین مجموع ورود و خروج گره مراکز تولید داشت.

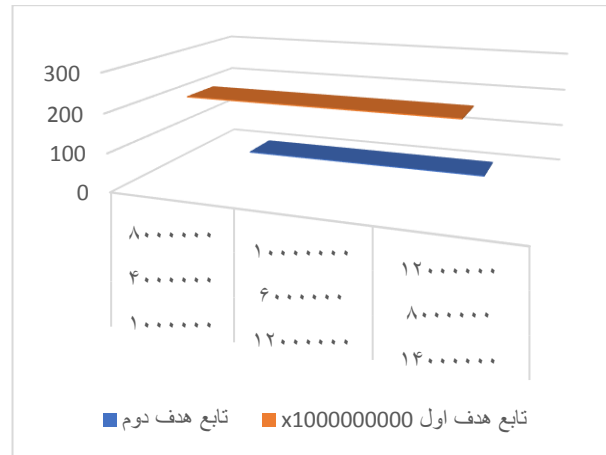
جدول (۷): مقادیر تابع هدف اول و دوم و تغییر پارامتر تقاضا، قیمت فروش و حدمعین برای مجموع ورود و خروج گره مراکز تولید بحرانی

تغییر پارامتر تقاضا درصد تغییر	تغییر پارامتر قیمت فروش درصد تغییر	تغییر پارامتر حدمعین درصد تغییر	تغییر تابع هدف اول	تغییر تابع هدف دوم
۱۰٪	۱۰٪	۱۰٪	۲۳۳۱۰۹	۱۷۲۱۵
۲۰٪	۲۰٪	۲۰٪	۲۳۳۱۰۹	۱۷۲۱۵
۳۰٪	۳۰٪	۳۰٪	۲۳۳۱۰۹	۱۷۲۱۵

مدل و حل آن در شبکه تأمین کاشی و سرامیک، برخی از بینش های مدیریتی را برای تصمیم گیرندگان در این زمینه به شرح زیر فراهم کرده است:

- ✓ اتخاذ بهترین تصمیم برای میزان تولید و انبار و حمل و نقل در شبکه با در نظر گرفتن افزایش تاب آوری و افزایش سود
- ✓ اتخاذ بهترین تصمیم در شبکه تأمین کاشی و سرامیک
- ✓ استفاده از نتایج مدل پیشنهادی برای صنایع مختلف مشابه

از تقاضا است بنابراین با افزایش ظرفیت تولید، میزان سود و تاب آوری ثابت می ماند و افزایش ظرفیت تأثیری نخواهد داشت. چون تقاضا برابر با ظرفیت بوده است با کاهش ظرفیت نیز مدل را غیر ممکن می ساخت.



شکل (۵): تغییرات تابع هدف اول و دوم بر حسب تغییرات پارامتر ظرفیت مراکز تولید

جدول (۶): مقادیر تابع هدف اول و دوم و تغییر پارامتر ظرفیت مراکز تولید

تغییر پارامتر ظرفیت مرکز تولید تولید یک * 10 ⁶	تغییر پارامتر ظرفیت مرکز تولید سه * 10 ⁶	تغییر پارامتر ظرفیت مرکز تولید دو * 10 ⁶	تابع هدف اول * 10 ⁶	تابع هدف دوم
۸	۴	۱۰	۲۳۳۱۰۹	۲/۶۲۴
۱۰	۶	۱۲	۲۳۳۱۰۹	۲/۶۲۴
۱۲	۸	۱۴	۲۳۳۱۰۹	۲/۶۲۴

بررسی میزان تأثیرگذاری دیگر پارامترها (کاهش ۲۰ درصد) بر روی توابع اهداف در جدول (۷) نشان داده شده است. همان طور که مشخص است تأثیر پارامتر حد معین برای مجموع ورود و خروج گره برای مراکز تولید تأثیر بیشتری از دو پارامتر دیگر بر روی دو تابع هدف می گذارد، با کاهش این پارامتر همچنان گره بحرانی وجود دارد و باعث می شود که مدل به سمت کمتر شدن پاسخ گویی تقاضا برود بنابراین سود نیز کاهش یافته است. با کاهش قیمت فروش، سود کاهش یافته است که کاملاً طبیعی است. با کاهش تقاضا نیز سود کاهش می یابد که طبیعی است ولی هدف تاب آوری به دلیل پارامتر حد معین برای مجموع ورود و خروج یک گره، شامل تقاضای از دست رفته کمتری خواهد بود بنابراین باعث افزایش تاب آوری خواهد شد.

۸. نتیجه گیری و پیشنهادات

اخیراً زنجیره های تأمین به سوی شبکه های تأمین درهم آمیخته در حال تکامل اند. این ساختارهای جدید، پویا و در حال تکامل، متفاوت از زنجیره تأمین های خطی با ساختارهای ایستا هستند و نیاز به بازنگری در برخی از مفاهیم سنتی دارند و تمرکز آنها مربوط به بحث بقا می باشد و تجزیه و تحلیل بقا در سطح شبکه های تأمین درهم آمیخته

- ✓ در نظر گرفتن پارامترهای مهم برای گرفتن نتایج مطلوب از دو هدف افزایش تاب‌آوری و افزایش سود
- برای تحقیقات آتی پیشنهاد می‌گردد که مسأله با در نظر گرفتن ابعاد تاب‌آوری دیگر بررسی شود و جهت انطباق بیشتر مسأله با شرایط واقعی می‌توان از پارامترهای غیرقطعی استفاده نمود و مسأله را در شرایط عدم قطعیت حل کرد. استفاده از رویکردهای فراابتکاری و مقایسه نتایج آن با این مدل از جمله موضوعاتی است که می‌تواند در آینده توسط محققین بررسی گردد. همچنین تغییر در برخی از مفروضات مسأله متغیرهای عدد صحیح و دیگر ارتباطات برگشتی و عمودی در سطوح دیگر نیز از دیگر پیشنهادات نویسندگان برای علاقه‌مندان به این موضوع می‌باشد.
- مراجع**
- [1] 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.
 - [2] Feizabadi, J., Gligor, D. M., & Choi, T. Y. (2021). Examining the resiliency of intertwined supply networks: a jury-rigging perspective. *International Journal of Production Research*, 1-20.
 - [3] Wang, M., & Yao, J. (2021). Intertwined supply network design under facility and transportation disruption from the viability perspective. *International Journal of Production Research*, 1-31.
 - [4] Levalle, R. R., & Nof, S. Y. (2015). Resilience by teaming in supply network formation and re-configuration. *International Journal of Production Economics*, 160, 80-93.
 - [5] Ivanov, D. (2020). Viable supply chain model: integrating agility, resilience and sustainability perspectives—lessons from and thinking beyond the COVID-19 pandemic. *Annals of Operations Research*, 1-21.
 - [6] Fraccascia, L., Giannoccaro, I., & Albino, V. (2017). Rethinking resilience in industrial symbiosis: conceptualization and measurements. *Ecological Economics*, 137, 148-162.
 - [7] Dubey, R., A. Gunasekaran, and T. Papadopoulos. (2019b). "Disaster Relief Operations: Past, Present and Future." *Annals of Operations Research* 283 (1-2): 1-8.
 - [8] Ivanov, D., Dolgui, A., & Sokolov, B. (2019). The impact of digital technology and Industry 4.0 on the ripple effect and supply chain risk analytics. *International Journal of Production Research*, 57(3), 829-846.
 - [9] Ivanov, D., & Dolgui, A. (2019). Low-Certainty-Need (LCN) supply chains: a new perspective in managing disruption risks and resilience. *International Journal of Production Research*, 57(15-16), 5119-5136.
 - [10] Chibani, A., Delorme, X., Dolgui, A., & Pierreval, H. (2018). Dynamic optimisation for highly agile supply chains in e-procurement context. *International journal of production research*, 56(17), 5904-5929.
 - [11] Wang, J., R. Dou, R. R. Muddada, and W. Zhang. (2018). "Management of a Holistic Supply Chain Network for Proactive Resilience: Theory and Case Study." *Computers and Industrial Engineering* 125: 668-677.
 - [12] Kelly, K., and K. Marchese. (2015). Supply Chains and ISNs. *Business Ecosystems Come of age*. Deloitte University Press, pp. 55-65.
 - [13] Demirel, G., MacCarthy, B. L., Ritterskamp, D., Champneys, A. R., & Gross, T. (2019). Identifying dynamical instabilities in supply networks using generalized modeling. *Journal of Operations Management*, 65(2), 136-159.
 - [14] Zhao, K., Zuo, Z., & Blackhurst, J. V. (2019). Modelling supply chain adaptation for disruptions: An empirically grounded complex adaptive systems approach. *Journal of Operations Management*, 65(2), 190-212.
 - [15] Pavlov, A., Ivanov, D., Pavlov, D., & Slinko, A. (2019b). Optimization of network redundancy and contingency planning in sustainable and resilient supply chain resource management under conditions of structural dynamics. *Annals of Operations Research*, 1-30.
 - [16] Tan, W. J., Cai, W., & Zhang, A. N. (2020). Structural-aware simulation analysis of supply chain resilience. *International Journal of Production Research*, 58(17), 5175-5195.
 - [17] Dubey, R., Gunasekaran, A., Childe, S. J., Fosso Wamba, S., Roubaud, D., & Foropon, C. (2021). Empirical investigation of data analytics capability and organizational flexibility as complements to supply chain resilience. *International Journal of Production Research*, 59(1), 110-128.
 - [۱۸] خلیلی، پویا، کاظمی، فکور، ثقیه، امیرمحمد. (۱۴۰۱). طراحی یک شبکه زنجیره‌تأمین بنزین پایدار و تاب‌آور تحت شرایط عدم قطعیت اختلال (مطالعه موردی: شبکه زنجیره‌تأمین بنزین استان خراسان رضوی). *مدیریت صنعتی*، ۱۱۴(۱)، ۲۷-۷۹.
 - [۱۹] موسوی، مهسا، جمالی، غلامرضا، قربانپور، احمد. (۱۴۰۰). ارائه مدل بهینه‌سازی شبکه زنجیره‌تأمین سبزتاب‌آور در صنایع سیمان. *مدیریت صنعتی*، ۱۱۳(۲)، ۲۴۵-۲۲۲.
 - [۲۰] شیشه‌بری، داوود، عبدالعظیمی، امید، عندلیب اردکانی، داوود. (۱۴۰۰). زنجیره‌تأمین حلقه بسته پایدار و تاب‌آور دارو با تأمین‌کننده پشتیبان تحت شرایط بیماری کرونا (کووید-۱۹). *نشریه پژوهش‌های مهندسی صنایع در سیستم‌های تولید*، ۹(۱۹)، ۵۳-۳۳.
 - [21] Mousazadeh, M., Torabi, S. A., & Zahiri, B. (2015). A robust possibilistic programming approach for pharmaceutical supply chain network design. *Computers & Chemical Engineering*, 82, 115-128.
 - [22] Balaman, Ş. Y., & Selim, H. (2016). Sustainable design of renewable energy supply chains integrated with district heating systems: A fuzzy optimization approach. *Journal of cleaner production*, 133, 863-885.
 - [23] Cardoso, S. R., Barbosa-Póvoa, A. P., Relvas, S., & Novais, A. Q. (2015). Resilience metrics in the assessment of complex supply-chains performance operating under demand uncertainty. *Omega*, 56, 53-73.
 - [24] Carvalho, H., Barroso, A. P., Machado, V. H., Azevedo, S., & Cruz-Machado, V. (2012). Supply chain redesign for resilience using simulation. *Computers & Industrial Engineering*, 62(1), 329-341.
 - [25] 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.
 - [26] Fahimnia, B., & Jabbarzadeh, A. (2016). Marrying supply chain sustainability and resilience: A match made in heaven. *Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review*, 91, 306-324.
 - [27] Zahiri, B., Zhuang, J., & Mohammadi, M. (2017). Toward an integrated sustainable-resilient supply chain: A pharmaceutical case study. *Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review*, 103, 109-142.

A risk-sharing-based resilient renewable energy supply network model under the COVID-19 pandemic. *Sustainable Production and Consumption*, 25, 484-498.

[۲۸] زمانیان، محمدرضا. (۱۳۹۹). مدل سازی ریاضی زنجیره تأمین تاب آور و پایدار نفت و گاز طبیعی (چاپ اول). نشر اسماء الزهرا.
[29] Tsao, Y. C., Thanh, V. V., Lu, J. C., & Wei, H. H. (2021).



DOI: 10.22084/IER.2023.27187.2108

Designing a Model for Intertwined Supply Network Based on Resilience

F. Rahmani Meybodi¹, A. Alem Tabriz^{2*}, M. Zandiyeh³, D. Talabi⁴

¹. Ph.D. Candidate, Department of Industrial Management and Information Technology, Faculty of Management and Accounting, Shahid Beheshti University, Tehran, Iran

². Professor, Department of Industrial Management and Information Technology, Faculty of Management and Accounting, Shahid Beheshti University, Tehran, Iran

³. Professor, Department of Industrial Management and Information Technology, Faculty of Management and Accounting, Shahid Beheshti University, Tehran, Iran

⁴. Assistant Professor, Department of Industrial Management and Information Technology, Faculty of Management and Accounting, Shahid Beheshti University, Tehran, Iran

ARTICLE INFO

Article history:

Received: 2022/04/06

Accepted: 2022/07/23

Keywords:

Intertwined Supply Network
Supply Chain Dynamics
Mathematical Modeling
Resilience
Multi-Objective Programming

ABSTRACT

Recently, supply chains and supply networks are developing towards intertwined supply networks. These new, dynamic structures are different from linear supply chains with static structures and require a revision of some traditional concepts. The aim of this research is mathematical modeling of the three-level supply network (including suppliers, firms, customers) based on resilience. Its approach is quantitative and mathematical modeling. In this research, first the problem is modeled and solved using real data in GAMS software, and after determining the optimal values of the decision variables, the results are analyzed. Also, a sensitivity analysis has been performed on the effective parameter (production capacity). The analysis of the results showed that increase of the capacity parameter did not affect the total cost of the network due to the constant demand. The proposed model, while optimizing the intertwined supply networks, is able to strengthen the resilience of the network in the face of disruption. On the other hand, the effectiveness of the proposed approach has been shown by using it in a case study of the intertwined supply network of tiles and ceramics.

* Corresponding author. A. Alem Tabriz
Tel.: 021-22431843; E-mail address: a-tabriz@sbu.ac.ir