

## مدلسازی ریاضی دو هدفه برای طراحی شبکه‌های زنجیره تأمین تاب‌آور حلقه بسته

مریم بهادران<sup>۱</sup>، مهدی فدایی اشکیکی<sup>۲</sup>، محمد طالقانی<sup>۳</sup>، مهدی همایونفر<sup>۴</sup>

### چکیده

در محیط‌های عملیاتی پر اختلال و همراه با ریسک بالا، طراحی صحیح شبکه زنجیره تأمین می‌تواند عواملی مانند تأمین پایداری، کاهش اختلال و افزایش توان اطمینان را به‌موجب تأمین و استمرار فعالیت، بیشتر کند. برای جلوگیری از ناکارآمدی‌های ناشی از طراحی‌های مجزا، لازم است که طراحی شبکه‌های مستقیم و معکوس به هم ادغام شود. در زنجیره تأمین حلقه بسته، علاوه بر جریان عادی کالا که از تأمین‌کننده به مصرف‌کنندگان نهایی منتقل می‌شود، به جریان معکوس محصولات برای بازیافت، بازسازی یا انهدام نیز توجه می‌شود. در این تحقیق یک شبکه زنجیره تأمین حلقه بسته تاب‌آور تحت شرایط ریسک‌های احتمالی و اختلال در سطوح تولیدکنندگان، توزیع‌کنندگان و مشتریان طراحی شده است. مدل پیشنهاد شده قادر است به‌صورت همزمان تعداد گره‌ها را ماکزیمم و هزینه کل را کمینه نماید. مسئله بهینه‌سازی چند هدفه با استفاده از روش معیار جامع به ازای  $P = 1$  و  $P = 2$  حل شده است. بر اساس نتایج حاصل شده، مدل پیشنهادی قادر است مقدار محصولات تولید شده، میزان تولیدات با ظرفیت بالا، مسیر انتقال محصولات، میزان جریان محصولات در هر مسیر و مقدار توابع هدف را تعیین نماید. سرانجام، یک تحلیل حساسیت بر روی پارامتر احتمال رخداد خرابی در گره و مسیر انجام شده است. طبق نتایج تحلیل حساسیت مشاهده شده است که اگر بروز خرابی در هر مسیر کاهش یابد، بیشترین بهبود در تابع هدف دوم حاصل می‌شود.

**واژگان کلیدی:** زنجیره تأمین، حلقه بسته، تاب‌آوری، بهینه‌سازی چند هدفه

- 
۱. دانشجوی دکتری گروه مدیریت صنعتی، واحد رشت، دانشگاه آزاد اسلامی، رشت، ایران
  ۲. استادیار گروه مدیریت صنعتی، واحد رشت، دانشگاه آزاد اسلامی، رشت، ایران. [fadaei@iaurasht.ac.ir](mailto:fadaei@iaurasht.ac.ir)
  ۳. دانشیار گروه مدیریت صنعتی، واحد رشت، دانشگاه آزاد اسلامی، رشت، ایران.
  ۴. استادیار گروه مدیریت صنعتی، واحد رشت، دانشگاه آزاد اسلامی، رشت، ایران.

## مقدمه

در سال‌های اخیر، با افزایش نگرانی‌های زیست‌محیطی، تصویب قوانین دولتی، محدودیت منابع طبیعی و تأثیر قوانین سبز، زنجیره تأمین حلقه بسته توجه بیشتری را به خود جلب کرده است (Zhu et al, 2024). مفهوم زنجیره تأمین حلقه بسته به دلیل این درک که هر دو زنجیره تأمین معکوس و مستقیم نیازمند مدیریت همزمان هستند، اهمیت ویژه‌ای یافته است (Chobar et al, 2022). پیکره‌بندی هر دو شبکه زنجیره تأمین معکوس و مستقیم تأثیر قابل توجهی بر عملکرد هر یک از جریان‌ها دارد (Lotfi et al, 2022)؛ بنابراین، برای جلوگیری از ناکارآمدی‌های ناشی از طراحی‌های مجزا، لازم است که طراحی شبکه‌های مستقیم و معکوس به هم ادغام شود. در زنجیره تأمین حلقه بسته، علاوه بر جریان عادی کالا که از تأمین‌کننده به مصرف‌کنندگان نهایی منتقل می‌شود، به جریان معکوس محصولات برای بازیافت، بازسازی یا انهدام نیز توجه می‌شود (Asadia & Abolghasemianb, 2018). زنجیره‌های حلقه بسته با ارائه محصولات متنوع در سطوح کیفیت مختلف و با توجه به محصولات بازیافتی، تأثیر زیادی بر بهبود عملکرد کلی زنجیره تأمین از طریق افزایش سود، تولید و رضایت مشتریان دارند (Farahani et al, 2013). صرفه‌جویی اقتصادی و سودآوری قابل توجه در زنجیره‌های تأمین حلقه بسته، به همراه اهمیت زیست‌محیطی و انسانی این حوزه، موجب شده است که بسیاری از محققان به بررسی و مطالعه در این زمینه پردازند (Abolghasemian et al, 2022). مسئله دیگری که در طراحی شبکه‌های زنجیره تأمین مطرح است، تاب‌آوری است. تاب‌آوری به توانایی یک سامانه برای بازگشت به حالت پایدار پس از وقوع شکست اشاره دارد (Starr et al, 2003). این مفهوم به شرکت‌ها این امکان را می‌دهد که شکست‌های زنجیره تأمین را مدیریت کرده و تحویل محصولات و خدمات خود به مشتریان را ادامه دهند (Raian et al, 2023). هدف از تحلیل و مدیریت تاب‌آوری زنجیره تأمین، جلوگیری از انتقال به وضعیت نامطلوبی است که در آن احتمال وقوع شکست‌ها وجود دارد. در سیستم‌های زنجیره تأمین، هدف نشان دادن واکنش مؤثر به اثرات منفی آشفتگی‌ها است (Carvalho et al, 2012)؛ بنابراین، آگاهی کارکنان در تمامی سطوح شرکت از شکست‌ها و تلاش برای یادگیری از آن‌ها، حتی شکست‌های کوچک، ضروری است. مدیران نیز باید زیرساخت مناسبی برای مدیریت ریسک ایجاد

کنند که شامل تخصیص نیروی انسانی و منابع اطلاعاتی باشد تا بتوانند به طور تخصصی به مدیریت و پاسخ‌گویی به ریسک‌های واقعی و درک شده بپردازند ([Ambulkar et al., 2015](#)).

اهمیت تاب‌آوری در مواجهه با شکست‌های زنجیره تأمین نباید نادیده گرفته شود. شرکت‌های تاب‌آور نسبت به شکست‌های زنجیره تأمین آسیب‌پذیری کمتری دارند و در مدیریت این شکست‌ها توانمندی بیشتری از خود نشان می‌دهند ([Zsidisin et al., 2010; Blackhurst et al., 2011](#)). استراتژی‌های تاب‌آوری شامل دو بُعد هستند: ۱. بازیابی شرایط آسیب‌دیده در یک دوره زمانی و هزینه قابل قبول، ۲. کاهش تأثیر آشفتگی‌ها از طریق تغییر سطح اثرگذاری یک تهدید بالقوه ([Carvalho et al., 2012](#)). بنابراین، در این تحقیق به ارائه مدل ریاضی چندهدفه برای زنجیره تأمین حلقه بسته تاب‌آور در سطوح مختلف زنجیره تأمین (تولیدکنندگان، توزیع‌کنندگان و مشتریان) در حالت چند محصولی در یک شرکت تولیدی فعال در زمینه صنایع غذایی پرداخته شده است. مسئله اساسی در این پژوهش، ارضای نیاز به حداکثرسازی تاب‌آوری زنجیره تأمین و حداقل‌سازی هزینه‌ها است.

باقیمانده مقاله به صورتی که مشخص شده است، سازماندهی شده است. در بخش دوم، یک مرور تاریخی برای بررسی مطالعات گذشته به منظور شناسایی شکاف تحقیق ارائه شده است. در بخش سوم روش شناسایی تحقیق ارائه شده است. در بخش چهارم نتایج حاصل از بکارگیری مدل پیشنهاد شده در یک مطالعه موردی واقعی در صنایع غذایی ارائه شده است و سرانجام، یک نتیجه‌گیری کلی به همراه پیشنهاداتی برای تحقیقات آتی ارائه شده است.

### مبانی نظری و پیشینه پژوهش

در این بخش از تحقیق، به تحلیل مطالعات پیشین در زمینه زنجیره تأمین حلقه بسته، تاب‌آور و ریسک اختلال پرداخته شده است. به عنوان مثال، ژو و همکاران ([Zhu et al., 2024](#)) در مطالعه خود به بررسی چشم‌انداز پیچیده تولید به موقع مدرن برای اقلام فاسد شدنی پرداخته‌اند. این تحقیق یک رویکرد دوگانه را برای افزایش رضایت مشتری با تمرکز بر کاهش کمبود محصول و بررسی سیاست‌های متنوع برای تضمین کیفیت تولیدکنندگان ارائه می‌دهد. همچنین، این مطالعه به تعامل پیچیده عوامل مختلف، از

جمله سرمایه‌گذاری‌های سبز تحت قوانین تجارت و سقف کربن، طرح‌های تشویقی مرتبط با تولید و طبقه‌بندی مبتنی بر مهارت کارگران می‌پردازد و به بررسی خرابی‌های تصادفی ماشین‌آلات و نوسانات مرتبط با نرخ تقاضا نیز می‌پردازد. در ادامه، این مطالعه مدل‌های موجودی تولید پایدار سازگار با اختلالات را با محدودیت‌های مختلف فرموله می‌کند و پس از تصادفی‌سازی و غیر فازی‌سازی، تصمیمات بهینه‌ای را تعیین می‌کند که به طور همزمان شاخص رضایت مشتری جدید را به حداکثر می‌رساند و هزینه کل را در شش مدل ریاضی پیچیده به حداقل می‌رساند.

لی و همکاران ([Li et al., 2024](#)) در مقاله خود، رویکردی ترکیبی از سطوح قیمت‌گذاری و استراتژی منبع‌یابی خرده‌فروشی رقابتی را بررسی کرده‌اند که قادر است اختلالات عرضه را با در نظر گرفتن خسارت‌های منحل شده بهینه‌سازی کند. این تحقیق به بررسی استراتژی‌های بهینه منبع‌یابی و قیمت‌گذاری در دو نوع بازی استاکلبرگ و یک نوع بازی نش پرداخته است.

شی و نی ([Shi & Ni, 2024](#)) دو مدل برنامه‌ریزی را ارائه کرده‌اند که تصمیمات راهبردی را قبل از اختلال و عملیات زنجیره تأمین را پس از اختلال بهینه می‌سازد. مدل‌های پیشنهادی معیار  $p$ -تاب‌آوری را برای کنترل هزینه در سناریوهای اختلال معرفی می‌کنند و از نظریه عدم قطعیت برای رسیدگی به عدم قطعیت پارامترها بدون داده‌های تاریخی استفاده می‌شود. این دو مدل برنامه‌نویسی به معادل‌های قطعی متناظر خود تبدیل شده و با روش سیمپلکس حل می‌شوند. در نهایت، اعتبار و امکان‌سنجی مدل‌های پیشنهادی نشان داده شده و تأثیر پارامترهای حیاتی بر راه‌حل بهینه با اجرای مجموعه‌ای از نمونه‌های تولید شده به‌طور تصادفی و یک مورد عملی بررسی گردیده است.

مطالعه رایان و همکاران ([Raian et al., 2023](#)) به شناسایی و تعیین کمیت ریسک‌های عملیاتی و زیست‌محیطی در صنعت ریسندگی پرداخته است. این تحقیق از روش ارزیابی مصنوعی فازی به عنوان یک رویکرد نوین در صنعت ریسندگی و سایر صنایع استفاده کرده و شانزده متغیر ریسک عملیاتی و زیست‌محیطی را در دو گروه ریسک شناسایی کرده است. یکی از یافته‌های کلیدی این مطالعه، شناسایی آلودگی هوا ناشی از ایف، سر و صدای بیش از حد، جابجایی نامناسب مواد، قطع برق و خرابی

مکرر ماشین است. همچنین، ارزش بحرانی ریسک کلی این بخش با مقدار ۳.۹۷ نشان‌دهنده سطح قابل توجهی از ریسک است.

مطالعه والی سیار و همکاران ([Vali-Siar et al, 2022](#)) به بررسی طراحی شبکه زنجیره تأمین تاب‌آور ترکیبی در حالت حلقه بسته و باز تحت ریسک‌های عملیاتی و اختلال پرداخته است. برای مقابله با ریسک اختلال، چندین راهبرد انعطاف‌پذیری از جمله منابع متعدد، تقویت تسهیلات، افزودن ظرفیت تولید اضافی، توزیع چند کاناله و قیمت‌گذاری به کار گرفته شده است.

تحقیق فروزش و همکاران ([Foroozesh et al, 2022](#)) به طراحی شبکه زنجیره تأمین تاب‌آور سبز برای محصولات فاسد شدنی تحت ریسک اختلال و عدم قطعیت پرداخته و هدف آن به حداقل رساندن اثرات اختلال با ارائه راهبردهای جدید است. ذاکر و یاوری (۲۰۱۹) به طراحی شبکه زنجیره تأمین حلقه بسته سبز و تاب‌آور برای محصولات فاسد شدنی تحت ریسک اختلال در شبکه برق پرداخته‌اند.

در سال‌های اخیر، مطالعات و تحقیقات گسترده‌ای در زمینه مدیریت ریسک و پیش‌بینی ریسک‌های محتمل در زنجیره‌های تأمین انجام شده است. در حال حاضر، تمرکز اصلی تحقیقات بر مدیریت اختلال و ریسک عملیاتی در سطوح تولیدکنندگان، توزیع‌کنندگان و مشتریان است. عوامل مختلفی می‌توانند منجر به اختلالات شوند، از جمله بلایای طبیعی و حوادث داخلی و بیرونی. هدف این تحقیق، کاهش تأثیرات اختلالات با برنامه‌ریزی صحیح است. مطالعات موجود در حوزه طراحی شبکه زنجیره تأمین حلقه بسته تاب‌آور تحت شرایط عدم قطعیت و اختلال در سطوح تولیدکنندگان، توزیع‌کنندگان و مصرف‌کنندگان نهایی در داخل کشور محدود است؛ بنابراین این تحقیق به طراحی شبکه زنجیره تأمین حلقه بسته تاب‌آور تحت شرایط ریسک‌های عملیاتی و اختلال در سطوح تولیدکنندگان، توزیع‌کنندگان و مشتریان می‌پردازد. با توجه به موارد اشاره شده، یکی از شکاف‌های اساسی در این حوزه تحقیقاتی، ارائه یک مدل ریاضی چندهدفه برای زنجیره تأمین حلقه بسته تاب‌آور است. ایجاد چنین مدلی می‌تواند به بهبود پیش‌بینی و مدیریت بهتر ریسک‌های مرتبط با زنجیره تأمین و افزایش توانمندی‌های تاب‌آوری کسب و کارها کمک کند. پژوهش‌های گذشته نشان داده‌اند که توسعه یک مدل ریاضی مناسب که عوامل تاب‌آور را در نظر بگیرد، می‌تواند به بهبود

بهره‌وری، کاهش هزینه‌ها و افزایش توانمندی زنجیره تأمین واحدهای کسب و کار منجر شود. این مدل‌ها قادرند به کاربران اطلاعات قابل اعتمادی ارائه دهند تا بتوانند ریسک‌های عملیاتی و اختلالات را به صورت بهینه مدیریت کنند. از این رو، پژوهش‌های آینده در این زمینه می‌توانند بهبود و پیشرفت بیشتری در مدل‌سازی زنجیره تأمین حلقه بسته تاب‌آور به ارمغان آورند و به صورت جامع‌تر به مسائل مرتبط با زنجیره تأمین پاسخ دهند.

### روش‌شناسی پژوهش

اصلی‌ترین مرجع مدل‌سازی این تحقیق، مقاله «مدل بهینه‌سازی چند هدفه برای طراحی شبکه‌های زنجیره تأمین تاب‌آور»<sup>۱</sup> نوشته (Margolis, et al. (2018 است. از دلایل انتخاب این مقاله می‌توان به مواردی اشاره کرد: مقاله در مجله بین‌المللی اقتصاد تولید<sup>۲</sup> در زمینه کاربرد مدل‌سازی ریاضی به چاپ رسیده است و دارای میزان ضریب تأثیر<sup>۳</sup> ۵.۱، نمایه شده در دیتابیس آنلاین الزویر<sup>۴</sup> و در چارک اول معتبرترین ژورنال‌های تخصصی حوزه تولید، مهندسی صنایع و مدیریت است. ارائه دهنده مدل تخصصی در حوزه زنجیره تأمین است که از آن می‌توان برای کاربردهای مختلف استفاده نمود و با فرض ارزیابی تعامل بین حداقل‌سازی هزینه کل شبکه و حداکثرسازی ارتباط کلی شبکه زنجیره تأمین همراه با مجموعه‌ای از راه‌حل‌ها با مقادیر مختلف هزینه و مقادیر ارتباطی نوشته شده است. ابتکار عمل بدین شرح است: برای اولین بار در ادبیات موضوع، مسئله طراحی شبکه زنجیره تأمین تحت اهداف هزینه و اتصال شبکه، یک مدل جدید بهینه‌سازی چند هدفه قطعی برای ساخت یک شبکه با حداقل هزینه برای جلوگیری از ایجاد اختلال، همچنین فراهم کردن امکان برای تصمیم‌گیرندگان جهت اولویت‌بندی تاب‌آوری شبکه نسبت به قیمت و برعکس، ایجاد شده است.

در این قسمت یک مدل دو هدفه ارائه می‌شود که هدف اول آن، بیشینه‌سازی تاب‌آوری زنجیره تأمین و هدف دوم آن، کمینه‌سازی هزینه‌ها است. هزینه‌ها نیز شامل هزینه‌های تولید با سطح ظرفیت پایین، هزینه‌های تولید با سطح ظرفیت بالا و همچنین

<sup>1</sup> A multi-objective optimization model for designing resilient supply chain networks

<sup>2</sup> International Journal of Production Economics

<sup>3</sup> Impact Factor

<sup>4</sup> Elsevier

هزینه مسیر و هزینه‌های مازاد است که به وسیله جریان سطح بالا بر روی گره‌ها و یال‌ها ایجاد می‌شود.

تعریف مجموعه‌ها، متغیرها و پارامترهای مدل ریاضی شبکه زنجیره تأمین مسئله تحقیق، بدون ملاحظات سناریو

در جدول (۱) پارامترها و مؤلفه‌های اساسی مدل ریاضی شبکه زنجیره تأمین مسئله ارائه می‌گردد (تعریف این پارامترها در حالت قطعیت کامل ارائه گردیده است).

جدول ۱- مؤلفه‌های طراحی شبکه زنجیره تأمین مسئله تحقیق، بدون ملاحظات سناریو

<p><math>N</math>: مجموعه‌ای از همه گره‌ها</p> <p><math>E</math>: مجموعه‌ای از همه یال‌ها</p> <p><math>P</math>: مجموعه‌ای از همه کالاها</p> <p><math>D_p \cdot S_p</math>: مجموعه‌ای از گره‌های تقاضا و تأمین</p> <p><math>FS(i)</math>: مجموعه‌ای از همه گره‌هایی که از گره <math>i</math> خارج می‌شوند</p> <p><math>RS(i)</math>: مجموعه‌ای از همه گره‌هایی که به گره <math>i</math> وارد می‌شوند</p>	مجموعه‌ها
<p><math>Zip</math>: یک متغیر صفر و یک، کالای نوع <math>P</math> را در گره <math>i</math> با ظرفیت بالا تولید کنیم =  <math>1</math>، در غیر این صورت =  <math>0</math></p> <p><math>Y_{ij}</math>: یک متغیر صفر و یک، کالای نوع <math>J</math> را در یال <math>i</math> با ظرفیت بالا منتقل شود =  <math>1</math>، در غیر این صورت =  <math>0</math></p> <p><math>W_{ip}</math>: مقدار محصول <math>P</math> تولید شده در گره <math>i</math></p> <p><math>X_{ijp}</math>: جریان محصول <math>P</math> بر روی یال <math>ij</math></p> <p><math>X'_{ijkp}</math>: یال <math>i</math> و <math>j</math> برای رساندن محصول <math>P</math> به گره تقاضای <math>k</math>، فعال است یا خیر</p> <p><math>V_{kjp}</math>: تعداد گره‌هایی که در مسیر تقاضای محصول <math>P</math> به گره تقاضای <math>k</math> ختم می‌شوند</p>	متغیرها
<p><math>d_{ip}</math>: تقاضا برای محصول <math>P</math> در گره <math>I</math></p> <p><math>b_{ijp}</math>: هزینه هر واحد جریان محصول <math>P</math> روی یال <math>i</math> و <math>j</math></p> <p><math>c_{ip}</math>: هزینه هر واحد از محصول <math>P</math> تولید شده روی گره <math>i</math></p> <p><math>u_{ij}^+, u_{ij}^-</math>: جریان ظرفیت یال <math>i</math> و <math>j</math> در سطح بالا و سطح پایین</p> <p><math>r_{ip}^+, r_{ip}^-</math>: ظرفیت تولید برای محصول <math>P</math> روی گره <math>i</math> در سطح بالا و سطح پایین</p> <p><math>f_{ij}</math>: هزینه وارد شده به جریان ظرفیت یال <math>i</math> و <math>j</math> اگر با ظرفیت بالا روی یال قرار گیریم</p>	پارامترها

<p><math>g_{ip}</math>: هزینه وارد شده به جریان ظرفیت گره <math>i</math> و <math>j</math> اگر با ظرفیت بالا روی گره قرار گیریم</p>	
--	--

در جدول (۲) مفروضات مسئله در شبکه زنجیره تأمین در حالت قطعیت کامل بدون ملاحظات سناریو ارائه شده است.

جدول ۲- مفروضات شبکه زنجیره تأمین مسئله تحقیق، بدون ملاحظات سناریو

کمیبود تقاضا مجاز نمی‌باشد.	مفروضات مسئله
انتقال عرضی (جانبی) نداریم.	
امکان اختلال در مراکز وجود دارد.	
امکان اختلال در یال‌ها وجود دارد.	
رخداد یا عدم رخداد اختلال در سناریوهای مختلف، متفاوت است.	
ظرفیت تولید در دو سطح بالا و پایین و به صورت قطعی تعریف می‌شود.	
مقدار تقاضای هر مشتری از هر محصول در سناریوهای مختلف، متفاوت است.	
ظرفیت انتقال کالا در یال‌ها در دو سطح بالا و پایین و به صورت قطعی تعریف می‌شود.	
شاخص تاب‌آوری زنجیره براساس تعداد یال‌های ورودی به گره‌های تقاضا تعیین می‌شود.	

سرانجام، مدل ریاضی شبکه زنجیره تأمین در حالت تاب‌آوری زنجیره ارائه گردید. همان‌طور که در روابط مشاهده می‌گردد، توابع هدف مدل ارائه شده از جنس پیشینه‌سازی مقدار تقاضا و تعداد گره‌های موجود و کمینه‌سازی انواع هزینه‌های شبکه زنجیره تأمین می‌باشند. بنابراین اهداف متناقض به لحاظ ماهیت، بهینه می‌گردند. سایر محدودیت‌ها در قالب روابط ذیل ارائه شده است:

$$\max V = \sum_{p \in P} \sum_{k \in D_p} d_{kp} \cdot v_{kp} \quad 1$$

$$\min C = \sum_{p \in P} \sum_{i \in N} (c_{ip} \cdot w_{ip} + g_{ip} \cdot z_{ip}) + \sum_{(i,j) \in E} \left( f_{ij} \cdot y_{ij} + \sum_{p \in P} b_{ijp} \cdot x_{ijp} \right) \quad 2$$



S.t:

$$\sum_{j \in RS(i)} x_{jip} + w_{ip} = \sum_{j \in FS(i)} x_{ijp} + d_{ip} \quad \forall p \in P, i \in N \quad ۳$$

$$w_{ip} \leq r_{ip}^- + (r_{ip}^+ - r_{ip}^-) \cdot z_{ip} \quad \forall p \in P, i \in N \quad ۴$$

$$\sum_{p \in P} x_{ijp} \leq u_{ij}^- + (u_{ij}^+ - u_{ij}^-) \cdot y_{ij} \quad \forall (i, j) \in E \quad ۵$$

$$x'_{ijkp} \leq 1 - L_{\{u_{ij}^- = 0\}} (1 - y_{ij}) \quad \forall p \in P, k \in D_p, (i, j) \in E \quad ۶$$

$$\sum_{j \in FS(i)} x'_{ijkp} \leq 1 - L_{\{r_{ip}^- = 0\}} (1 - z_{ip}) \quad \forall p \in P, k \in D_p, i \in S_p \quad ۷$$

$$\sum_{j \in FS(i)} x'_{ijkp} \leq 1 \quad \forall p \in P, k \in D_p, i \in N \setminus (S_p \cup \{k\}) \quad ۸$$

$$\sum_{j \in FS(i)} x'_{ijkp} - \sum_{j \in RS(i)} x'_{jikp} = 0 \quad \forall p \in P, k \in D_p, i \in N \setminus (S_p \cup \{k\})$$

$$\sum_{j \in RS(i)} x'_{ikkp} = v_{kp} \quad \forall p \in P, k \in D_p \quad ۱۰$$

$$x_{ijp} \geq 0 \quad \forall p \in P, (i, j) \in E$$

$$w_{ip} \geq 0 \quad \forall p \in P, i \in N$$

$$v_{kp} \geq 0 \quad \forall p \in P, k \in D_p$$

$$x'_{ijkp} \in \{0, 1\} \quad \forall p \in P, k \in D_p, (i, j) \in E \quad ۱۱$$

$$y_{ij} \in \{0, 1\} \quad \forall (i, j) \in E$$

$$z_{ip} \in \{0, 1\} \quad \forall p \in P, i \in N$$

محدودیت (۳)، مرتبط با محدودیت تقاضا می‌باشد. به عبارت دیگر، برآورده سازی تقاضا را بیان می‌کند که در آن کمبود تقاضا مجاز نیست و تعادل تقاضا برقرار است. یعنی به ازای هر محصول و هر گره، مجموعه محصولاتی که از همه یال‌ها وارد آن گره می‌شوند به اضافه مقدار تولیدی در آن گره، برابر است با مقدار محصولی که از آن گره خارج می‌شود به همراه مصرف خود گره مورد نظر. محدودیت (۴)، مرتبط با رابطه بین تولید و متغیر صفر و یک است، به طوری که تعیین می‌کند تولید با ظرفیت سطح بالا و یا سطح پایین صورت گرفته و بر روی گره‌ها اعمال گردیده است. چنانچه  $W$  برابر با صفر باشد، تولید نداریم. محدودیت (۵) مرتبط با رابطه بین تولید و متغیر صفر و یک است، به طوری که تعیین می‌کند تولید با ظرفیت سطح بالا و یا سطح پایین صورت گرفته و بر روی یال‌ها اعمال گردیده است. چنانچه  $X$  برابر با صفر باشد، تولید نداریم. محدودیت (۶) مرتبط با تابعی دو ضابطه‌ای<sup>۱</sup> می‌باشد، یعنی هنگامی که تولید کالای نوع  $Z$  در یال  $i$  برابر با یک باشد، می‌توانیم با ظرفیت بالا بر روی یال‌ها جریان داشته باشیم و هنگامی که تولید کالای نوع  $Z$  در یال  $i$  برابر با صفر باشد، می‌توانیم با ظرفیت پایین بر روی یال‌ها جریان داشته باشیم. محدودیت (۷) تابعی دو ضابطه‌ای می‌باشد، یعنی هنگامی که یالی با جریان سطح بالا وجود نداشته باشد و ظرفیت سطح پایین آن نیز صفر در نظر گرفته شود، یال مذکور برای رساندن آن محصول، فعال نمی‌باشد، به بیان دیگر، یال مذکور برای رساندن آن محصول به آن تقاضا فعال نمی‌باشد و برای رساندن محصول به آن گره به کار گرفته نمی‌شود، پس در این صورت هیچ مسیری نمی‌توانیم داشته باشیم. محدودیت (۸) به ازای یال‌هایی برقرار است که  $i$  آن‌ها تأمین کننده باشد و  $Z$ ‌هایی باشد که در حال خارج شدن از یال هستند. پس این محدودیت هنگامی برقرار است که به ازای هر گره تعیین کننده  $i$  عضو  $S_p$ ،  $Z$ ‌ها می‌توانند مجموع یال‌هایی را شامل شوند که آن یال‌ها به گره‌هایی که به گره  $i$  متصل هستند، مرتبط شوند. بنابراین، چنانچه جریان سطح بالا وجود نداشت و ظرفیت سطح پایین هم صفر در نظر گرفته شد، می‌توان گفت که از آن یال برای انتقال

---

<sup>1</sup> Binary function

مسیر، هیچ استفاده‌ای نشده است. محدودیت (۹) بیانگر این قضیه است که چنانچه گره‌ای تولید سطح بالا نداشته و ظرفیت تولید هم صفر بود، در این صورت آن یال نمی‌تواند برای رسیدن به محصول مورد نظر، یا به تأمین کننده مشخص نقشی داشته باشد. محدودیت (۱۰) بیانگر فعال بودن یال  $i$  و  $j$  برای رساندن محصول  $P$  به گره تقاضای  $k$  است؛ یعنی تمام گره‌هایی که می‌توانستند به  $k$  ورود پیدا کنند. محدودیت (۱۱) محدودیتی رایج در شبکه می‌باشد که بیان می‌دارد مجموعه مقادیری که از یک گره خارج می‌شوند باید برابر با مجموعه مقادیری باشند که به یک گره وارد می‌شوند.

### تجزیه و تحلیل داده‌ها

در این بخش از تحقیق مدل ریاضی توسعه داده شده در نرم‌افزار LINGO نسخه ۱۸ براساس ۱۰ گره، ۲ محصول و تحت سه سناریو (اختلال در تأمین، مسیر و رویکرد مالوی) فرمول‌نویسی شده است. با اجرای مدل در این نرم‌افزار، متغیرهای تصمیم مسئله اندازه‌گیری شده‌اند. در جدول ۳ مقدار محصولات  $P$  تولید شده در هر گره را نشان می‌دهد.

جدول ۳- مقدار محصولات تولید شده در هر گره

گره	محصول	سناریو ۱	سناریو ۲	سناریو ۳
۱	۱	۰,۰۰۰۰۰۰	۰,۰۰۰۰۰۰	۱,۴۰۰۰۰۰
	۲	۰,۰۰۰۰۰۰	۰,۰۰۰۰۰۰	۲,۵۰۷۱۴۳
۲	۱	۰,۰۰۰۰۰۰	۰,۰۰۰۰۰۰	۰,۰۰۰۰۰۰
	۲	۰,۰۰۰۰۰۰	۰,۰۰۰۰۰۰	۰,۰۰۰۰۰۰
۳	۱	۰,۰۰۰۰۰۰	۱۰,۶۰۰۰۰	۶,۸۰۰۰۰۰
	۲	۰,۰۰۰۰۰۰	۷,۷۰۰۰۰۰	۰,۰۰۰۰۰۰
۴	۱	۰,۰۰۰۰۰۰	۰,۰۰۰۰۰۰	۰,۰۰۰۰۰۰
	۲	۰,۰۰۰۰۰۰	۰,۰۰۰۰۰۰	۰,۰۰۰۰۰۰
۵	۱	۰,۰۰۰۰۰۰	۰,۰۰۰۰۰۰	۰,۰۰۰۰۰۰
	۲	۰,۰۰۰۰۰۰	۰,۰۰۰۰۰۰	۰,۰۰۰۰۰۰
۶	۱	۰,۰۰۰۰۰۰	۰,۰۰۰۰۰۰	۰,۰۰۰۰۰۰
	۲	۰,۰۰۰۰۰۰	۰,۰۰۰۰۰۰	۰,۰۰۰۰۰۰
۷	۱	۰,۰۰۰۰۰۰	۰,۰۰۰۰۰۰	۰,۰۰۰۰۰۰
	۲	۰,۰۰۰۰۰۰	۰,۰۰۰۰۰۰	۰,۰۰۰۰۰۰
۸	۱	۰,۰۰۰۰۰۰	۰,۰۰۰۰۰۰	۰,۰۰۰۰۰۰
	۲	۰,۰۰۰۰۰۰	۰,۰۰۰۰۰۰	۰,۰۰۰۰۰۰

۰,۰۰۰۰۰۰	۰,۰۰۰۰۰۰	۰,۰۰۰۰۰۰	۱	۹
۰,۰۰۰۰۰۰	۰,۰۰۰۰۰۰	۰,۰۰۰۰۰۰	۲	
۳,۹۰۰۰۰۰	۰,۰۰۰۰۰۰	۸,۲۰۰۰۰۰	۱	۱۰
۸,۲۹۲۸۵۷	۰,۰۰۰۰۰۰	۱۰,۳۰۰۰۰۰	۲	

در جدول ۳ مشاهده می‌شود که در گره‌های ۲ و ۴ تا ۹ هیچ یک از محصولات تحت هر سناریو تولید نمی‌شوند. اما در سایر گره‌های ۱، ۳ و ۱۰ تولید محصولات تحت برخی سناریوها امکان‌پذیر است. برای مثال، در گره ۱، تحت سناریو سوم هر دو محصول به میزان ۱.۴۰ و ۲.۵۰۷ واحد تولید می‌شوند. در گره ۳ تحت سناریو دوم هر دو محصول و تحت سناریو ۳ فقط یک محصول تولید می‌شوند. سرانجام در گره ۱۰ تحت سناریو اول و سوم هر دو محصول تولید می‌شوند.

در جدول ۴ مقدار متغیر Zip مشخص شده است. با استفاده از این متغیر مشخص می‌کنیم که هر یک از محصولات تولید شده تحت هر سناریو در کدام گره با ظرفیت بالا می‌توانیم تولید کنیم.

جدول ۴- میزان تولیدات محصولات با ظرفیت بالا در هر گره

محصول		گره
۲	۱	
۰,۰۰۰۰۰۰	۰,۰۰۰۰۰۰	۱
۱,۰۰۰۰۰۰	۱,۰۰۰۰۰۰	۲
۰,۰۰۰۰۰۰	۰,۰۰۰۰۰۰	۳
۰,۰۰۰۰۰۰	۰,۰۰۰۰۰۰	۴
۱,۰۰۰۰۰۰	۱,۰۰۰۰۰۰	۵
۰,۰۰۰۰۰۰	۰,۰۰۰۰۰۰	۶
۰,۰۰۰۰۰۰	۰,۰۰۰۰۰۰	۷
۱,۰۰۰۰۰۰	۰,۰۰۰۰۰۰	۸
۰,۰۰۰۰۰۰	۰,۰۰۰۰۰۰	۹
۰,۰۰۰۰۰۰	۰,۰۰۰۰۰۰	۱۰

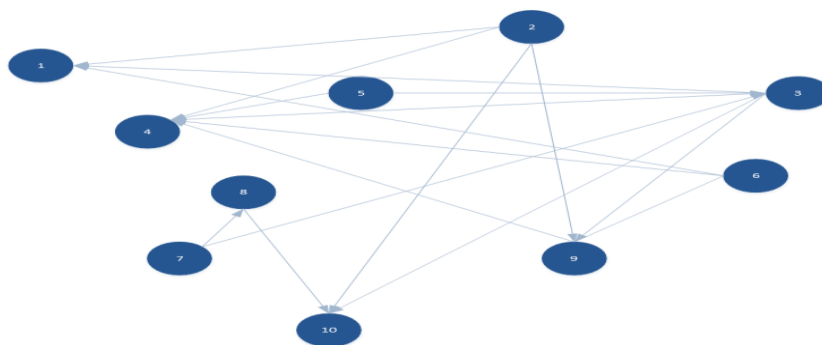
با توجه به نتایج جدول ۴، در گره‌های ۱، ۳، ۴، ۶، ۷، ۹ و ۱۰ هیچ کدام از محصولات با ظرفیت بالا تولید نمی‌شوند. این می‌تواند به دلیل روبرو شدن با اختلال در تأمین قطعات و اختلال در مسیر منتهی به این گره‌ها باشد که امکان تولید محصول با ظرفیت بالا را در این گره‌ها سلب می‌کند. اما در سایر گره‌ها مانند گره ۲ و ۵ می‌توانیم

هر دو نوع محصول را با ظرفیت بالا تولید نماییم. همچنین، در گره ۸ قادر خواهیم بود تا یک نوع از محصول را با ظرفیت بالا تولید نماییم.

در جدول ۵، مسیر انتقال محصولات با ظرفیت بالا نشان داده شده است. مطابق با نتایج به دست آمده می‌توانیم مشخص کنیم که از طریق کدام مسیرها می‌توانیم محصولات با ظرفیت بالا را جابه‌جا نماییم. برای مثال، مشخص شده است که در گره ۲ می‌توانیم هر نوع از محصولات را با ظرفیت بالا تولید نماییم. مسیر انتقال این محصولات از گره ۲ می‌تواند از طریق گره ۱، ۴، ۹ و ۱۰ باشد. یعنی مسیرهای ۲-۱، ۲-۴، ۲-۹ و ۲-۱۰ قادر خواهند بود محصولات با ظرفیت بالا را منتقل نمایند. در شکل ۱، مسیرهای ارتباطی با ظرفیت بالا برای هر گره نشان داده شده است.

جدول ۵- مسیر انتقال محصولات با ظرفیت بالا

گره	۱	۲	۳	۴	۵	۶	۷	۸	۹	۱۰
۱	۱,۰۰۰۰۰۰	۰,۰۰۰۰۰۰	۰,۰۰۰۰۰۰	۰,۰۰۰۰۰۰	۰,۰۰۰۰۰۰	۰,۰۰۰۰۰۰	۰,۰۰۰۰۰۰	۰,۰۰۰۰۰۰	۰,۰۰۰۰۰۰	۰,۰۰۰۰۰۰
۲	۱,۰۰۰۰۰۰	۱,۰۰۰۰۰۰	۰,۰۰۰۰۰۰	۰,۰۰۰۰۰۰	۰,۰۰۰۰۰۰	۰,۰۰۰۰۰۰	۰,۰۰۰۰۰۰	۰,۰۰۰۰۰۰	۰,۰۰۰۰۰۰	۰,۰۰۰۰۰۰
۳	۱,۰۰۰۰۰۰	۰,۰۰۰۰۰۰	۱,۰۰۰۰۰۰	۰,۰۰۰۰۰۰	۰,۰۰۰۰۰۰	۰,۰۰۰۰۰۰	۰,۰۰۰۰۰۰	۰,۰۰۰۰۰۰	۰,۰۰۰۰۰۰	۰,۰۰۰۰۰۰
۴	۰,۰۰۰۰۰۰	۰,۰۰۰۰۰۰	۰,۰۰۰۰۰۰	۱,۰۰۰۰۰۰	۰,۰۰۰۰۰۰	۰,۰۰۰۰۰۰	۰,۰۰۰۰۰۰	۰,۰۰۰۰۰۰	۰,۰۰۰۰۰۰	۰,۰۰۰۰۰۰
۵	۰,۰۰۰۰۰۰	۰,۰۰۰۰۰۰	۰,۰۰۰۰۰۰	۰,۰۰۰۰۰۰	۱,۰۰۰۰۰۰	۰,۰۰۰۰۰۰	۰,۰۰۰۰۰۰	۰,۰۰۰۰۰۰	۰,۰۰۰۰۰۰	۰,۰۰۰۰۰۰
۶	۰,۰۰۰۰۰۰	۰,۰۰۰۰۰۰	۰,۰۰۰۰۰۰	۰,۰۰۰۰۰۰	۰,۰۰۰۰۰۰	۱,۰۰۰۰۰۰	۰,۰۰۰۰۰۰	۰,۰۰۰۰۰۰	۰,۰۰۰۰۰۰	۰,۰۰۰۰۰۰
۷	۰,۰۰۰۰۰۰	۰,۰۰۰۰۰۰	۰,۰۰۰۰۰۰	۰,۰۰۰۰۰۰	۰,۰۰۰۰۰۰	۰,۰۰۰۰۰۰	۱,۰۰۰۰۰۰	۰,۰۰۰۰۰۰	۰,۰۰۰۰۰۰	۰,۰۰۰۰۰۰
۸	۰,۰۰۰۰۰۰	۰,۰۰۰۰۰۰	۰,۰۰۰۰۰۰	۰,۰۰۰۰۰۰	۰,۰۰۰۰۰۰	۰,۰۰۰۰۰۰	۰,۰۰۰۰۰۰	۱,۰۰۰۰۰۰	۰,۰۰۰۰۰۰	۰,۰۰۰۰۰۰
۹	۰,۰۰۰۰۰۰	۰,۰۰۰۰۰۰	۰,۰۰۰۰۰۰	۰,۰۰۰۰۰۰	۰,۰۰۰۰۰۰	۰,۰۰۰۰۰۰	۰,۰۰۰۰۰۰	۰,۰۰۰۰۰۰	۱,۰۰۰۰۰۰	۰,۰۰۰۰۰۰
۱۰	۰,۰۰۰۰۰۰	۰,۰۰۰۰۰۰	۰,۰۰۰۰۰۰	۰,۰۰۰۰۰۰	۰,۰۰۰۰۰۰	۰,۰۰۰۰۰۰	۰,۰۰۰۰۰۰	۰,۰۰۰۰۰۰	۰,۰۰۰۰۰۰	۱,۰۰۰۰۰۰



شکل ۱- شبکه ارتباطی مسیرهای ممکن برای انتقال محصولات با ظرفیت بالا

در جدول ۶، مقدار متغیر  $V_{kp}$  برای مشخص کردن تقاضا برای محصول  $p$  در گره منتهی به  $k$  اندازه‌گیری شده است. برای مثال، مطابق با شکل ۴-۱ وقتی به گره ۱ مسیر ختم می‌شود، یعنی مراجعه از گره ۲، ۳ و ۶ که امکان‌پذیر است، تقاضا برای هر دو محصول وجود دارد. اما وقتی مسیر به گره ۸ ختم می‌شود، یعنی مراجعه از گره ۷ امکان‌پذیر است، تقاضا فقط برای یک نوع از محصول وجود دارد. لازم به ذکر است که در مسیرهای منتهی به گره‌های ۲، ۳، ۵ و ۱۰ تقاضا به هر دو نوع از محصولات وجود دارد.

جدول ۶- اندازه‌گیری امکان‌پذیری تقاضای محصولات در گره‌های منتهی به مسیر

محصولات		گره
۲	۱	
۱,۰۰۰۰۰۰	۱,۰۰۰۰۰۰	۱
۱,۰۰۰۰۰۰	۱,۰۰۰۰۰۰	۲
۱,۰۰۰۰۰۰	۱,۰۰۰۰۰۰	۳
۰,۰۰۰۰۰۰	۰,۰۰۰۰۰۰	۴
۱,۰۰۰۰۰۰	۱,۰۰۰۰۰۰	۵
۰,۰۰۰۰۰۰	۰,۰۰۰۰۰۰	۶
۰,۰۰۰۰۰۰	۰,۰۰۰۰۰۰	۷
۱,۰۰۰۰۰۰	۰,۰۰۰۰۰۰	۸
۰,۰۰۰۰۰۰	۰,۰۰۰۰۰۰	۹
۱,۰۰۰۰۰۰	۱,۰۰۰۰۰۰	۱۰

در جدول ۷، جواب بهینه سراسری مدل پیشنهادی برای توابع هدف محاسبه شده است. براساس نتایج، تابع هدف اول برابر با ۱۸۲.۸۲۴۰ و تابع هدف دوم برابر با ۵۴۰.۶۵۴۰ واحد محاسبه شده‌اند و اطلاعات مربوط به تعداد دفعات تکرار، حالات نشدنی و زمان محاسباتی مسئله نشان داده شده است.

جدول ۷- نتایج حل مدل

تابع هدف	مقدار	حالات نشدنی	تکرار	زمان محاسباتی (ثانیه)
تابع هدف اول	۱۸۲.۸۲۴۰	۰	۱۶۹	۰.۵۶
تابع هدف دوم	۵۴۰.۶۵۴۰	۰	۱۳۲	۰.۹۸

در جدول ۸ نتایج محاسباتی مربوط به روش معیار جامع به ازای معیار  $p = 1$  و  $p = 2$  آمده است.

جدول ۸- نتایج محاسباتی معیار جامع

مقدار	معیار
۹۹.۴۸۴	$p = 1$
۷۹۰.۵۰۹	$p = 2$

### تحلیل حساسیت

در این بخش از تحقیق تأثیر احتمال رخداد خرابی در هر گره و یال را بر روی توابع هدف مورد بررسی قرار می‌دهیم. برای این منظور، ابتدا احتمال رخداد خرابی را برای هر گره ابتدا کاهش می‌دهیم. در این صورت کل احتمالات خرابی در هر گره را به سطح صفر می‌رسانیم. در این صورت فرض می‌شود که خرابی رخ نمی‌دهد. با اجرای مدل در این حالت، تابع هدف اول تغییر نمی‌کند؛ اما تابع هدف دوم از ۵۴۰.۵۶۴۰ به ۴۳۷.۰۲۶۴ کاهش می‌یابد. همچنین، مقدار تابع هدف به ازای  $p = 1$  از ۹۹.۴۸۴ به ۸۲.۳۷۲ و به ازای  $p = 2$  از ۷۹۰.۵۰۹ به ۶۷۷.۱۴۹ کاهش می‌یابد.

در جدول ۹ نتیجه بهبود در مقدار تابع هدف در صورت تغییرات نسبت به وضع موجود نشان داده شده است.

جدول ۹- میزان تغییرات در تابع هدف در صورت کاهش دادن احتمال خرابی

مقدار معیار جامع		مقدار تابع هدف		وضعیت
$p = 2$	$p = 1$	تابع هدف اول	تابع هدف دوم	
۷۹۰.۵۰۹	۹۹.۴۸۴	۱۸۲.۸۲۴	۵۴۰.۵۶۴	موجود
۶۷۷.۱۴۹	۸۲.۳۷۲	۱۸۲.۸۲۴	۴۳۷.۰۲۶	کاهش رخداد خرابی
۱۴.۳۰	۱۷.۲۰	۰.۰۰	۱۹.۱۰	میزان بهبود (درصد)

در ادامه احتمال افزایش خرابی در هر مسیر (یال) و تأثیر آن بر روی توابع هدف را بررسی می‌نماییم. برای این منظور، احتمال رخداد خرابی در تمامی یال‌ها را تا جای ممکن که مسئله از حالت شدنی بودن خارج نشود در بیشترین حالت ممکن در نظر می‌گیریم. براین اساس، مقدار تابع هدف اول مانند حالت قبل نسبت به وضعیت موجود

تغییر نمی‌کند. همچنین، تابع هدف دوم نسبت به وضع موجود از ۵۴۰.۵۶۴ به ۴۴۶.۷۵۶ کاهش می‌یابد. همچنین، مقدار تابع هدف به ازای  $p = 1$  از ۹۹.۴۸۴ به ۸۲.۳۷۲ و به ازای  $p = 2$  از ۷۹۰.۵۰۹ به ۶۹۲.۲۲۵ کاهش می‌یابد.

در جدول ۱۰ نتیجه بهبود در مقدار تابع هدف در صورت تغییرات نسبت به وضع موجود نشان داده شده است.

جدول ۱۰- میزان تغییرات در تابع هدف در صورت کاهش دادن احتمال خرابی در هر مسیر

مقدار معیار جامع		مقدار تابع هدف		وضعیت
$p = 2$	$p = 1$	تابع هدف دوم	تابع هدف اول	
۷۹۰.۵۰۹	۹۹.۴۸۴	۵۴۰.۵۶۴	۱۸۲.۸۲۴	موجود
۶۹۲.۲۲۵	۸۲.۳۷۲	۴۴۶.۷۵۶	۱۸۲.۸۲۴	کاهش رخداد خرابی
۱۲.۴۳	۱۷.۲۰	۱۷.۳۵	۰.۰۰۰	میزان بهبود (درصد)

همچنین، احتمال کاهش خرابی در هر مسیر (یال) و تأثیر آن بر روی توابع هدف بررسی شده است. برای این منظور، احتمال رخداد خرابی در تمامی یال‌ها را تا جای ممکن که مسئله از حالت شدنی بودن خارج نشود در کم‌ترین حالت ممکن در نظر می‌گیریم. براین اساس، مقدار تابع هدف اول مانند حالت‌های قبل نسبت به وضعیت موجود تغییر نمی‌کند. همچنین، تابع هدف دوم نسبت به وضع موجود از ۵۴۰.۵۶۴ به ۴۲۵.۴۹۵ کاهش می‌یابد. همچنین، مقدار تابع هدف به ازای  $p = 1$  از ۹۹.۴۸۴ به ۸۲.۳۷۲ و به ازای  $p = 2$  از ۷۹۰.۵۰۹ به ۶۵۲.۲۸۲ کاهش می‌یابد. در جدول ۱۱ نتیجه بهبود در مقدار تابع هدف در صورت تغییرات نسبت به وضع موجود نشان داده شده است.

جدول ۱۱- میزان تغییرات در تابع هدف در صورت کاهش دادن احتمال خرابی در هر مسیر

مقدار معیار جامع		مقدار تابع هدف		وضعیت
$p = 2$	$p = 1$	تابع هدف دوم	تابع هدف اول	
۷۹۰.۵۰۹	۹۹.۴۸۴	۵۴۰.۵۶۴	۱۸۲.۸۲۴	موجود
۶۵۲.۲۸۲	۸۲.۳۷۲	۴۲۵.۴۹۵	۱۸۲.۸۲۴	کاهش رخداد خرابی
۱۷.۴۸	۱۷.۲۰	۲۱.۲۸	۰.۰۰۰	میزان بهبود (درصد)



براساس نتایج به دست آمده در صورت کاهش در احتمال بروز خرابی در هر یال، میزان بهبود در مقدار توابع هدف دوم و به ازای  $p = 2$  در روش معیار جامع نسبت به وضع موجود بیشتر خواهد بود. بنابراین، برای ایجاد بهبود توصیه می‌شود تا بروز خرابی در هر مسیر را حداقل امکان کاهش دهیم. زیرا در این صورت صرفه‌جویی‌هایی به همراه خواهد بود.

### بحث و نتیجه‌گیری

در این تحقیق یک شبکه زنجیره تأمین حلقه بسته تاب‌آور تحت شرایط ریسک‌های احتمالی و اختلال در سطوح تولیدکنندگان، توزیع‌کنندگان و مشتریان طراحی شده است. مدل پیشنهاد شده با استفاده از دو تابع هدف برای حداکثر کردن گره‌ها و کمینه کردن هزینه کل ایجاد شده است که این مسئله بهینه‌سازی چند هدفه با استفاده از روش معیار جامع به ازای  $P = 1$  و  $P = 2$  حل شده است. برای حل مدل از دو رویکرد قطعی و فرا ابتکاری استفاده شده است. در حل قطعی از نرم‌افزار LINGO استفاده شده است. براساس حل مدل مقدار محصولات تولید شده، میزان تولیدات با ظرفیت بالا، مسیر انتقال محصولات، میزان جریان محصولات در هر مسیر براساس سناریوها مشخص شده‌اند. علاوه بر این، مقدار بهینه توابع هدف به دست آمده است.

در این تحقیق به طراحی شبکه زنجیره تأمین حلقه بسته تاب‌آور تحت شرایط ریسک‌های عملیاتی و اختلال در سطوح تولیدکنندگان، توزیع‌کنندگان و مشتریان با ملاحظات چند محصولی بودن در یک شرکت تولیدکننده فعال در زمینه صنایع غذایی پرداخته شد. مدل تحقیق، دو هدف اساسی را ارضاء نمود، بیشینه‌سازی تاب‌آوری زنجیره تأمین و کمینه‌سازی هزینه‌ها به گونه‌ای که هزینه‌های تولید با سطح ظرفیت پایین، هزینه‌های تولید با سطح ظرفیت بالا و همچنین هزینه‌های مسیر و هزینه‌های مازاد که به وسیله جریان‌هایی بر روی یال‌ها و گره‌ها ایجاد شد، بهینه گردید. مدل ارائه شده در این پژوهش به لحاظ خلاء تحقیقاتی، کامل‌کننده مطالعات مشابهی بوده که در فرایند طراحی شبکه زنجیره تأمین، اختلال را در سطوح تولید، توزیع و مشتری لحاظ کرده بودند (Zhang et al, 2018; Kolyaei et al, 2023) و به لحاظ استفاده از بهینه‌سازی استوار و روش حل مسئله، کامل‌کننده تحقیق موندال و کومار روی

(Mondal & Kumar Roy, 2021) بود. تحقیق پیش رو در بحث تاب‌آوری شبکه زنجیره تأمین با ملاحظات حلقه بسته بودن در شرایط تولید چند نوع محصول، کامل کننده تحقیق امین طهماسبی و همکاران (Amin-Tahmasbi, Vali-Siar et al., 2018) و منطبق بر تحقیق والی سیر و همکاران (2022) است. علاوه بر این، عدم قطعیت در بیشتر مسائل فقط تقاضا را شامل می‌شد؛ ولی در این مدل، عدم قطعیت در بیشتر پارامترها بررسی شده است. تحقیقات گذشته هر کدام با دیدگاه خاصی به تاب‌آوری نگریسته‌اند، رویکردهای زیست محیطی، اقتصادی و سازمانی از جمله آن‌ها بوده است. بنابراین بررسی تحقیقات آتی با ملاحظات مباحث نظری نوین مانند پایداری می‌تواند موضوعی قابل توجه برای مدیران در طراحی شبکه زنجیره تأمین باشد. همچنین با توجه به رویکردهای مبتنی بر تصمیم‌گیری‌های کلان در طراحی شبکه زنجیره تأمین، می‌توان بحث اختلال را در تمامی سطوح زنجیره تأمین بررسی نمود. با توجه به مؤلفه‌های پیش رو، اختلال در دنیای کنونی، زنجیره‌های تأمین بیش از پیش نیاز به طراحی به شکل استوار و تاب‌آور بودن دارند، بنابراین اهمیت صنایع غذایی به عنوان تولیدکننده محصولات حیات بخش در حوزه نیازهای بشری از اهمیت ویژه‌ای برخوردارند. همچنین در نظر گرفتن سایر ابعاد تاب‌آوری برای بررسی اثر آن‌ها بر زنجیره تأمین و ترکیب تاب‌آوری و پایداری و در نظر گرفتن مؤلفه‌های مرتبط در مدل ریاضی مفید و اثربخش می‌باشد. در پایان برای تحقیق بیشتر پیشنهاد می‌شود مجاز دانستن کمبود در مقدار تقاضا و توسعه مدل براساس آن توسط سایر محققان در نظر گرفته شود.

### تعارض منافع

«هیچ‌گونه تعارض منافع توسط نویسندگان بیان نشده است.»

### References

- Abolghasemian, M., Kanafi, A. G., & Daneshmand-Mehr, M. (2022). Simulation-based multiobjective optimization of open-pit mine haulage system: a modified-NBI method and meta modeling approach. Complexity, 2022. <https://doi.org/10.1155/2022/3540736>

- Ambulkar, S., Blackhurst, J., & Grawe, S. (2015). Firm's resilience to supply chain disruptions: Scale development and empirical examination. *Journal of Operations Management*, 33–34, 111–122. <https://doi.org/10.1016/j.jom.2014.11.002>
- Amin-Tahmasbi, H., & Alfi, S. (2018). A fuzzy multi-criteria decision model for integrated suppliers selection and optimal order allocation in the green supply chain. *Decision Science Letters*, 7(4), 549-566.
- Asadia, F., & Abolghasemianb, M. (2018). Review coordination of advertising policy and its effect on competition between retailer and manufacture in the supply chain. *Computational Research Progress in Applied Science and Engineering*, 4(3), 62-66.
- Baghersad, M. & Zobel, C.W. (2021). Assessing the extended impacts of supply chain disruptions on firms: An empirical study. *International Journal of Production Economics*, 231, Art. No. 107862. <https://doi.org/10.1016/j.ijpe.2020.107862>
- Blackhurst, J., Dunn, K. S., & Craighead, C. W. (2011). An Empirically Derived Framework of Global Supply Resiliency. *Journal of Business Logistics*, 32(4), 374–391. <https://doi.org/10.1111/j.0000-0000.2011.01032.x>
- Carvalho, Helena, Susana Garrido Azevedo, and Virgilio Cruz-Machado. “Agile and resilient approaches to supply chain management: influence on performance and competitiveness”. *Logistics research* 4(1-2),49-62, 2012. <https://doi.org/10.1007/s12159-012-0064-2>
- Chobar, A. P., Adibi, M. A., & Kazemi, A. (2022). Multi-objective hub-spoke network design of perishable tourism products using combination machine learning and meta-heuristic algorithms. *Environment, Development and Sustainability*, 1-28. <https://doi.org/10.1007/s10668-022-02350-2>
- Dixit, V. & Verma, P. & Tiwari, M.K. (2020). Assessment of pre and post-disaster supply chain resilience based on network structural parameters with CVaR as a risk measure. *International Journal of Production Economics*, 227. <https://doi.org/10.1016/j.ijpe.2020.107655>
- Falasca, M., Zobel, C.W., & Cook, D., (2008). A decision support framework to assess supply chain resilience. *The Proceedings of the 5<sup>th</sup> International ISCRAM Conference*, Washington, DC, USA, pp. 596–605.
- Farahani RZ, Rezapour S., Drezner T., Fallah S. (2013) Competitive supply chain network design: An overview of classifications, models, solution techniques and applications. *Omega*, 6(3), 14-29. <https://doi.org/10.1016/j.omega.2013.08.006>

- Foroozesh, N., Karimi, B., S.M. Mousavi, S. M. (2022). Green-resilient supply chain network design for perishable products considering route risk and horizontal collaboration under robust interval-valued type-2 fuzzy uncertainty: A case study in food industry. *Journal of Environmental Management*, 307, 114470. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2022.114470>
- Kolyaei, M., Azar, A., & Ghatari, A. R. (2023). An integrated robust optimisation approach to closed-loop supply chain network design under uncertainty: the case of the auto glass industry. *International Journal of Process Management and Benchmarking*, 14(3), 285-310.
- Li, W., Huang, S., Huang, K., Qi, Y., & An, H. (2024). The pricing and sourcing strategies of competitive retailers under supply disruption in the presence of liquidated damages. *Computers & Industrial Engineering*, 187, 109782. <https://doi.org/10.1016/j.cie.2023.109782>
- Lotfi, R., Kargar, B., Rajabzadeh, M., Hesabi, F., & Özceylan, E. (2022). Hybrid fuzzy and data-driven robust optimization for resilience and sustainable health care supply chain with vendor-managed inventory approach. *International Journal of Fuzzy Systems*, 24(2), 1216-1231. <https://doi.org/10.1007/s40815-021-01209-4>
- Margolis, J. T., Sullivan, K. M., Mason, S. J., & Magagnotti, M. (2018). A multi-objective optimization model for designing resilient supply chain networks. *International Journal of Production Economics*, 204, 174-185.
- Mondal, A., & Roy, S. K. (2021). Multi-objective sustainable opened-and closed-loop supply chain under mixed uncertainty during COVID-19 pandemic situation. *Computers & Industrial Engineering*, 159, 107453.
- Piraveenan, M. & Jing, H. & Matous, P. & Todo, Y. (2020). Topology of international supply chain networks: A case study using factset reveere datasets. *IEEE Access*, 8:154540–154559. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2020.3015910>
- Raian, S., Siddiqua, T., Moktadir, M. A., & Rahman, T. (2023). An empirical model for identifying and controlling operational and environmental risks in spinning industry in an emerging economy. *Computers & Industrial Engineering*, 180, 109244. <https://doi.org/10.1016/j.cie.2023.109244>
- Shi, H., & Ni, Y. (2024). Resilient supply chain network design under disruption and operational risks. *Soft Computing*, 28(4), 3283-3299. <https://doi.org/10.1007/s00500-023-09338-8>

- Soni, U., Vipul, J., and Sameer, K. (2014). Measuring supply chain resilience using a deterministic modeling approach. *Computers & Industrial Engineering* 74, 11-25, 2014. <https://doi.org/10.1016/j.cie.2014.04.019>
- Starr, R., Newfrock, J., & Delurey, M. (2003). Enterprise resilience: Managing risk in the networked economy. *Strategy and Business*, 30, 70–79.
- Toorajipour, R. & Sohrabpour, V. & Nazarpour, A. & d Oghazi, P. & Fischl, M. (2021). Artificial intelligence in supply chain management: A systematic literature review. *Journal of Business Research*, 122:502–517. <https://doi.org/10.1016/j.jbusres.2020.09.009>
- Vali-Siar, M.M. & Roghanian, E. & Jabbarzadeh, A. (2022). Resilient mixed open and closed-loop supply chain network design under operational and disruption risks considering competition: A case study. *Computers & Industrial Engineering*, 172: Part A, October 2022, 108513. <https://doi.org/10.1016/j.cie.2022.108513>
- Waters, D. (2011). *Supply chain risk management: vulnerability and resilience in logistics*. Kogan Page Publishers.
- Wieland, A., and Carl Marcus, W. (2013). The influence of relational competencies on supply chain resilience: a relational view. *International Journal of Physical Distribution & Logistics Management*, 43(4), 300-320. <https://doi.org/10.1108/IJPDLM-08-2012-0243-2012>
- Zhang, D., Wang, C. H., Zheng, D., & Yu, X. (2018). Process of innovation knowledge increase in supply chain network from the perspective of sustainable development. *Industrial management & data systems*, 118(4), 873-888.
- Zhu, Y., Garai, A., Karmakar, R., Sarkar, B., & Mazumder, S. (2024). Customer-centric policies for environmentally sustainable manufacturing of deteriorating items with varying quality control practices under disruptions. *Computers & Industrial Engineering*, 109895. <https://doi.org/10.1016/j.cie.2024.109895>
- Zsidisin, George A., & Wagner, S. M. (2010). Do Perceptions Become Reality? The Moderating Role of Supply Chain Resiliency on Disruption Occurrence. *Journal of Business Logistics*, 31(2), 1–20. <https://doi.org/10.1002/j.2158-1592.2010.tb00140.x>

### COPYRIGHTS

© 2023 by the authors. Licensee Advances in Finance and Investment Journal. This article is an open access article distributed under the terms and conditions of the Creative Commons Attribution 4.0 International (CC BY 4.0) (<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>).

