

طراحی یک زنجیره تأمین پایدار و تاب‌آور برای تولید مواد شیمیایی سبز تحت عدم قطعیت اخلاقی در تأمین‌کنندگان: یک رویکرد تصادفی دومرحله‌ای

مهدی نخعی‌نژاد^{۱*}، اسما رنجبر^۲

۱. گروه مهندسی صنایع، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه یزد، یزد، ایران

۲. گروه مهندسی صنایع، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه یزد، یزد، ایران

خلاصه

امروزه، گذار به سمت تولید پایدار مواد شیمیایی از منابع زیست‌توده با چالش‌های متعددی از جمله آسیب‌پذیری زنجیره‌های تأمین در برابر اخلاقی‌های پیش‌بینی نشده مواجه است. این پژوهش به منظور طراحی یک شبکه زنجیره تأمین که به‌طور همزمان پایدار و تاب‌آور باشد، یک مدل تصادفی دومرحله‌ای ارائه می‌دهد. در این مدل، ریسک اخلاقی در ظرفیت تأمین‌کنندگان اولیه با معرفی تأمین‌کنندگان ثانویه به‌عنوان یک راهکار استراتژیک برای افزایش تاب‌آوری، مدیریت می‌شود. مدل پیشنهادی دو هدف متضاد؛ کمینه‌سازی مجموع هزینه‌های مورد انتظار سیستم و کمینه‌سازی مجموع انتشارات گازهای گلخانه‌ای مورد انتظار را دنبال می‌کند. تصمیمات مرحله اول شامل مکان‌یابی و تعیین ظرفیت تأسیسات و عقد قرارداد با تأمین‌کنندگان پشتیبان بوده و تصمیمات مرحله دوم به تعیین جریان‌های عملیاتی پس از وقوع هر سناریوی اخلاقی می‌پردازد. نتایج نشان می‌دهد که این رویکرد یک چارچوب قدرتمند برای اتخاذ تصمیمات استراتژیک فراهم می‌کند که توازن میان هزینه‌های سرمایه‌گذاری در تاب‌آوری و ریسک ناشی از عدم قطعیت را بهبود می‌بخشد.

اطلاعات مقاله

تاریخچه مقاله:

دریافت ۱۴۰۴/۰۸/۱۲

بازنگری ۱۴۰۴/۱۲/۰۴

پذیرش ۱۴۰۴/۱۲/۰۷

(مقاله پژوهشی)

کلمات کلیدی:

زنجیره تأمین پایدار

تاب‌آوری

اخلاقی در تأمین‌کنندگان

۱. مقدمه

افزایش نگرانی‌های زیست‌محیطی و نیاز روزافزون به کاهش وابستگی به منابع فسیلی، صنایع شیمیایی را به سمت پارادایم‌های تولید پایدار سوق داده است. در این میان، بهره‌گیری از زیست‌توده به‌عنوان یک منبع کربن تجدیدپذیر، افق‌های جدیدی را برای تولید مواد شیمیایی سبز گشوده است. این گذار نه تنها به کاهش اثرات مخرب زیست‌محیطی کمک می‌کند، بلکه فرصت‌های اقتصادی جدیدی را نیز به همراه دارد. یکی از فناوری‌های نوظهور و امیدوارکننده در این عرصه، استفاده از فرآیندهای الکتروشیمیایی برای تبدیل زیست‌توده به مواد شیمیایی با ارزش است. الکتروشیمی سبز، با بهره‌گیری از انرژی الکتریکی تجدیدپذیر، امکان انجام واکنش‌های شیمیایی در دما

و فشار پایین‌تر، با گزینش‌پذیری بالاتر و پسماند کمتر را فراهم می‌آورد. این ویژگی‌ها، پتانسیل بالایی برای توسعه واحدهای تولیدی غیرمتمرکز و کارآمد ایجاد کرده است که می‌توانند به‌صورت بهینه در نزدیکی منابع زیست‌توده یا بازارهای مصرف قرار گیرند.

با این حال، موفقیت تجاری‌سازی این فناوری‌های نوین تنها به‌کارایی فرآیند شیمیایی محدود نمی‌شود، بلکه به شدت به طراحی یک زنجیره تأمین کارآمد و یکپارچه وابسته است. طراحی شبکه زنجیره تأمین یکی از مهم‌ترین تصمیمات استراتژیک در سطح مدیریت کلان است که به تعیین ساختار فیزیکی بهینه برای جریان مواد از نقطه تأمین تا نقطه مصرف می‌پردازد. این تصمیمات شامل مکان‌یابی بهینه تأسیسات تولیدی، تعیین ظرفیت آن‌ها، انتخاب

* نویسنده مسئول: مهدی نخعی‌نژاد

تلفن: ۰۳۵-۳۱۲۳۳۸۱۹؛ پست الکترونیکی: m.nakhaeinejad@yazd.ac.ir

شبکه برقرار کنند.

در ادامه این مقاله، ساختار زیر دنبال شده است. در بخش دوم، به مرور ادبیات موضوع پرداخته می‌شود. بخش سوم، فرمول‌بندی ریاضی مدل تصادفی دومرحله‌ای را به تفصیل تشریح می‌کند. در بخش چهارم، نتایج عددی حاصل از اجرای مدل و تحلیل حساسیت بر روی پارامترهای کلیدی ارائه و مورد بحث قرار می‌گیرد. در نهایت، بخش پنجم به نتیجه‌گیری و ارائه پیشنهاداتی برای تحقیق‌های آتی اختصاص یافته است.

۲. مرور ادبیات

پژوهش‌های متعددی در حوزه طراحی زنجیره‌های تأمین پایدار و تاب‌آور تحت عدم قطعیت انجام شده است. طراحی زنجیره‌های تأمین پایدار و تاب‌آور در سال‌های اخیر به‌عنوان یک حوزه کلیدی پژوهشی مورد توجه گسترده قرار گرفته است.

انجم شعاع^۱ و همکاران [۱] مدلی برای طراحی زنجیره‌تأمین چرخه‌ای با رویکرد پایداری و تاب‌آوری ارائه کردند که در آن مسأله انتشار آلاینده‌ها نیز مورد توجه قرار گرفته است. در این پژوهش، از یک مدل بهینه‌سازی تصادفی دومرحله‌ای ریسک‌گریز برای مدیریت عدم قطعیت‌های مربوط به تأمین‌کنندگان و تقاضا استفاده شده است. در مرحله نخست، تصمیمات راهبردی شامل انتخاب تأمین‌کنندگان و ظرفیت‌ها تعیین می‌شود و در مرحله دوم، با توجه به وضعیت هر سناریو، تصمیمات عملیاتی برای کاهش اثرات اختلال‌ها اتخاذ می‌گردد. هدف مدل، برقراری تعادل میان هزینه‌ها، کاهش انتشار آلاینده‌ها، و افزایش تاب‌آوری زنجیره است. نتایج حاصل از تحلیل نشان می‌دهد که مدل پیشنهادی می‌تواند توازن مؤثر بین پایداری زیست‌محیطی، تاب‌آوری در برابر اختلال‌ها و عملکرد اقتصادی برقرار کند.

جبارزاده^۲ و همکاران [۲] مدلی برای طراحی زنجیره‌تأمین پایدار و تاب‌آور در مواجهه با ریسک‌های اختلال ارائه کردند. در این پژوهش، از یک بهینه‌سازی تصادفی دوهدفه استفاده شده است تا ضمن بهبود عملکرد اقتصادی، سطح پایداری زنجیره در شرایط عدم قطعیت و ریسک‌های اختلال افزایش یابد. روش پیشنهادی با بهره‌گیری از خوشه‌بندی فازی و تحلیل ریسک، به کاهش هزینه‌های کل زنجیره کمک کرده و ابعاد زیست‌محیطی و اجتماعی پایداری را نیز ارزیابی و تقویت می‌کند. مطالعه‌ی موردی انجام شده در صنعت لوله‌های پلاستیکی حوزه مواد شیمیایی، کارایی مدل را در حفظ تعادل میان هزینه‌ها، تاب‌آوری و پایداری تأیید می‌کند. یافته‌ها نشان داد مدل‌های چندهدفه و تصادفی می‌توانند ابزاری مؤثر برای مدیریت ریسک‌های اختلال و ارتقای پایداری زنجیره‌تأمین باشند.

بیلگن^۳ و همکاران [۳] مدلی برای طراحی شبکه زنجیره‌تأمین زیست‌توده پایدار در شرایط عدم قطعیت ارائه کردند. در این پژوهش

تأمین‌کنندگان و تخصیص جریان‌های مواد اولیه و محصول نهایی در سراسر شبکه است. یک طراحی مناسب می‌تواند به‌طور همزمان هزینه‌های کل سیستم را کاهش داده و سطح خدمت‌رسانی به مشتریان را افزایش دهد و در عین حال، اهداف پایداری و کاهش اثرات زیست‌محیطی را نیز محقق سازد.

علی‌رغم اهمیت طراحی شبکه، بسیاری از مدل‌های کلاسیک در این حوزه، جهان را به‌صورت قطعی و با پارامترهای ثابت در نظر می‌گیرند. این در حالی است که زنجیره‌های تأمین در دنیای واقعی، به‌ویژه آن‌هایی که به منابع طبیعی مانند زیست‌توده وابسته‌اند، به‌شدت در معرض انواع عدم قطعیت‌ها و ریسک‌های پیش‌بینی نشده قرار دارند. اختلال در تأمین‌کنندگان یکی از جدی‌ترین این ریسک‌هاست که می‌تواند ناشی از رویدادهای طبیعی، مشکلات فنی، نوسانات اقتصادی یا عوامل ژئوپلیتیکی باشد. چنین اختلال‌هایی می‌توانند جریان مواد اولیه را به‌طور کامل متوقف کرده و منجر به هزینه‌های سنگین ناشی از توقف تولید، از دست دادن سهم بازار و آسیب به اعتبار برند شوند. منظور از «اختلال در تأمین‌کنندگان» در این پژوهش، هرگونه رویدادی است که باعث کاهش یا توقف ظرفیت عرضه مواد اولیه توسط تأمین‌کنندگان شود. این رویداد می‌تواند ناشی از عوامل طبیعی مانند سیل و زلزله، مشکلات فنی تجهیزات و خطوط تولید، نوسانات شدید اقتصادی و قیمتی، یا مسائل ژئوپلیتیکی و محدودیت‌های تجاری باشد. چنین اختلالاتی مستقیماً بر جریان مواد ورودی به شبکه تأمین اثر گذاشته و توان تولید را کاهش می‌دهد و در برخی موارد موجب توقف کامل تولید می‌شود.

بنابراین، دیگر صرفاً کارایی اقتصادی و پایداری زیست‌محیطی برای یک زنجیره‌تأمین مدرن کافی نیست و تاب‌آوری، یعنی توانایی شبکه برای مقاومت، سازگاری و بازیابی سریع از اختلال‌ها، به یک ضرورت انکارناپذیر تبدیل شده است.

این پژوهش با هدف پر کردن شکاف موجود در ادبیات موضوع، به طراحی یک زنجیره‌تأمین می‌پردازد که هر سه بعد کارایی اقتصادی، پایداری زیست‌محیطی و تاب‌آوری را به‌صورت یکپارچه در نظر می‌گیرد. برای دستیابی به این هدف، یک مدل ریاضی تصادفی دو مرحله‌ای توسعه داده شده است. رویکرد این مقاله به‌طور مشخص عدم قطعیت ناشی از اختلال در ظرفیت تأمین‌کنندگان اولیه را مدل‌سازی می‌کند. به‌منظور مدیریت این ریسک، استراتژی عقد قرارداد با تأمین‌کنندگان ثانویه (پشتیبان) به‌عنوان یک مکانیزم افزایش تاب‌آوری در مدل گنجانده شده است. مدل پیشنهادی با دو تابع هدف متضاد، یعنی کمینه‌سازی هزینه‌های کل و همچنین کمینه‌سازی انتشارات گازهای گلخانه‌ای مورد انتظار، یک مجموعه از راه‌حل‌های پارتو را تولید می‌کند. این راه‌حل‌ها به تصمیم‌گیرندگان این امکان را می‌دهد تا براساس اولویت‌های سازمانی خود، توازن مطلوبی میان هزینه‌ها، ملاحظات زیست‌محیطی و سطح تاب‌آوری

اختلالات تأمین و تغییرات محیطی افزایش می‌دهد. رویکرد پیشنهادی تلاش دارد تا بین کاهش هزینه‌ها، حفظ پایداری زیست‌محیطی و ارتقای انعطاف‌پذیری عملیاتی توازن برقرار کند. براساس مرور ادبیات، مدل‌های چندهدفه و تصادفی در سال‌های اخیر به‌طور فزاینده به‌عنوان ابزارهایی کلیدی در مدیریت زنجیره‌های تأمین تحت عدم قطعیت شناخته می‌شوند. همچنین ترکیب همزمان معیارهای تاب‌آوری و پایداری با روش‌های بهینه‌سازی پیشرفته به‌عنوان یکی از مؤثرترین راهکارها برای مقابله با پیچیدگی‌ها و نوسانات سیستم‌های تأمین مطرح شده است.

روی^۴ و همکاران [۷] و همکاران چارچوبی بهینه‌سازی تصادفی دومرحله‌ای برای مدل‌سازی زنجیره‌تأمین خردفروشی ارائه کرده‌اند که در آن استراتژی‌های تاب‌آوری به‌صورت همزمان در فرآیند تصمیم‌گیری لحاظ شده است. در مرحله نخست، تصمیمات کلان طراحی و برنامه‌ریزی زنجیره اتخاذ می‌شود و در مرحله دوم، واکنش‌های تطبیقی به اختلالات و نوسانات محیطی مدیریت می‌گردد. این ساختار دومرحله‌ای باعث شده مدل بتواند ضمن پاسخ به عدم قطعیت‌های محیطی، انعطاف‌پذیری عملیاتی و پایداری عملکردی زنجیره را افزایش دهد. مرور ادبیات پژوهش نشان می‌دهد که تلفیق روش‌های بهینه‌سازی تصادفی با رویکردهای تاب‌آوری، به‌ویژه در زنجیره‌های خردفروشی، راهکاری نوین برای کاهش ریسک، بهبود سازگاری و حفظ توازن میان هزینه و کارایی محسوب می‌شود. همچنین مطالعات پیشین تاکید دارند که طراحی سیستم‌های سازگار با شوک‌های محیطی، کلید ایجاد زنجیره‌هایی منقطع و پایدار در برابر نوسانات بازار است.

سبوحی^۵ و همکاران [۴] رویکردی بهینه‌سازی چندهدفه و نوآورانه برای طراحی زنجیره‌تأمین پایدار و مقاوم با لحاظ ملاحظات منطقه‌ای ارائه کرده‌اند. مدل پیشنهادی به‌صورت همزمان سه بعد اقتصادی، زیست‌محیطی و اجتماعی پایداری را مورد توجه قرار داده و مؤلفه‌ی تاب‌آوری زنجیره را براساس تفاوت‌های جغرافیایی و منطقه‌ای تأمین‌کنندگان تقویت می‌کند. در این چارچوب، عدم قطعیت‌ها و ناهمگونی‌های محیطی در کنار ریسک‌های مرتبط با منابع تأمین شناسایی و در مدل تصمیم‌گیری لحاظ شده‌اند. مرور ادبیات مرتبط نشان می‌دهد که ادغام ابعاد پایداری و تاب‌آوری با رویکرد منطقه‌بندی یکی از مؤثرترین شیوه‌ها برای مقابله با اختلالات و نوسانات بازار است. همچنین، استفاده از مدل‌های بهینه‌سازی چندهدفه مبتنی بر داده‌های مکانی ضمن افزایش انعطاف‌پذیری و پایداری عملکرد زنجیره، منجر به کاهش آسیب‌پذیری‌های زیست‌محیطی و اقتصادی در سطح سیستم‌های تأمین می‌شود.

لو^۶ و همکاران [۹] مدلی دو مرحله‌ای برای انتخاب تأمین‌کننده پایدار با لحاظ ریسک اختلالات زنجیره‌تأمین ارائه کرده‌اند. در مرحله نخست، تأمین‌کنندگان براساس سه بعد پایداری اقتصادی،

از یک برنامه‌ریزی تصادفی دومرحله‌ای ریسک‌گریز به‌منظور تعیین مکان بهینه واحدهای فرآوری و مدیریت جریان مواد استفاده شده است. معیار ریسک‌گریز CVAR برای کنترل ریسک ناشی از نوسانات تقاضای برق و هزینه‌های حمل‌ونقل در مدل به‌کار گرفته شد. افزون بر کاهش هزینه‌های کلی زنجیره، محدودیت‌هایی نیز به‌منظور کاهش انتشار گازهای گلخانه‌ای لحاظ گردید. نتایج مطالعه‌ی موردی در منطقه‌ی ازبیر ترکیه نشان داد مدل ریسک‌گریز نسبت به مدل بدون لحاظ ریسک، عملکردی کارآمدتر داشته و تحلیل حساسیت پارامتر ریسک به بهبود تصمیم‌گیری در شرایط عدم قطعیت کمک می‌کند.

ژانگ^۱ و همکاران [۴] چارچوبی چندهدفه برای بهینه‌سازی زنجیره‌تأمین سبز در سه مرحله خرید، حمل‌ونقل و توزیع ارائه کردند. هدف مدل، کاهش همزمان هزینه‌های عملیاتی و انتشار کربن از طریق یک رویکرد ترکیبی مبتنی بر الگوریتم جستجوی کوکو و الگوریتم طوفان فکری در قالب ساختاری دومرحله‌ای است. این ترکیب موجب بهبود توان کاوش سراسری و بهره‌برداری محلی مدل شده و در نتیجه کارایی آن را در بهینه‌سازی سفارش‌دهی و برنامه‌ریزی حمل‌ونقل افزایش می‌دهد. نتایج بیانگر آن است که مدل پیشنهادی توانسته به راهکارهایی پایدار و اقتصادی در زنجیره‌تأمین منجر شود. همچنین مرور ادبیات مقاله نشان می‌دهد که الگوریتم‌های ترکیبی و تحلیل حساسیت پارامترها نقشی کلیدی در ارتقای عملکرد بهینه‌سازی‌های سبز دارند.

سلطانی^۲ و همکاران [۵] با هدف بهبود زنجیره‌تأمین سوخت‌های زیستی، رویکردی دومرحله‌ای مبتنی بر تحلیل پیش‌بینی و بهینه‌سازی ارائه کردند. در مرحله نخست، با بهره‌گیری از تحلیل‌های پیش‌بینی، تقاضا، منابع زیست‌توده و شرایط بازار تخمین زده شده و عدم قطعیت‌های کلیدی شناسایی می‌شود. در مرحله دوم، مدلی بهینه‌سازی چندهدفه طراحی می‌گردد تا تخصیص منابع و بهره‌برداری بهینه از زنجیره را با توجه به داده‌های پیش‌بینی‌شده مدیریت کند. ترکیب پیش‌بینی دقیق با بهینه‌سازی کارآمد منجر به افزایش عملکرد کلی زنجیره، کاهش هزینه‌ها و ارتقای پایداری زیست‌محیطی می‌شود. یافته‌های پژوهش همچنین تاکید دارند که مدل‌های دومرحله‌ای و ادغام داده‌های پیش‌بینی در فرآیند تصمیم‌گیری، ابزارهایی مؤثر برای مقابله با پیچیدگی‌ها و عدم قطعیت‌های محیطی زنجیره‌های سوخت زیستی هستند و توجه همزمان به اهداف اقتصادی و زیست‌محیطی، عامل کلیدی در توسعه راهکارهای پایدار این حوزه به‌شمار می‌رود.

مجددقیقه‌ی^۳ [۶] مدلی برنامه‌ریزی تصادفی چندهدفه برای طراحی زنجیره‌های تأمین پایدار و مقاوم در برابر عدم قطعیت‌ها ارائه کرده است. این مدل به‌طور همزمان سه بعد اصلی اقتصادی، زیست‌محیطی و تاب‌آوری را مد نظر قرار داده و با بهره‌گیری از رویکرد برنامه‌ریزی تصادفی، توان زنجیره را در مواجهه با نوسانات تقاضا،

4. Roy
5. Sabouhi
6. Lu

1. Zhang
2. Soltani
3. Majdfaghihi

تاب آور در برابر ریسک های اختلال پرداخته اند. این پژوهش با هدف ایجاد توازن میان کارایی اقتصادی، پایداری زیست محیطی و تاب آوری عملیاتی، مدلی بر پایه ی برنامه ریزی هدف وزنی ارائه کرده است. نوآوری اصلی مقاله در ادغام همزمان شاخص های پایداری مانند انتشار CO₂ و رد پای کربن با شاخص های تاب آوری از جمله هزینه ی مورد انتظار ناشی از اختلال EDC در قالب یک چارچوب تصمیم گیری چندهدفه است. در مدل پیشنهادی، ریسک های مکان محور ناشی از بلایای طبیعی یا اختلالات انسانی لحاظ شده تا شبکه بتواند در برابر بحران ها پایداری عملکردی خود را حفظ نماید. مرور پژوهش های پیشین نشان داده است که بسیاری از زنجیره های تأمین در زمان بحران، پایداری زیست محیطی را فدای کارایی کوتاه مدت می کنند، در حالی که مدل حاضر با ایجاد تعادل میان کاهش هزینه ها، حفظ پایداری و افزایش تاب آوری، چارچوبی جامع برای مدیریت همزمان اختلال ها و الزامات پایداری در صنایع مختلف به ویژه صنعت پوشاک ارائه می دهد.

کومار^۵ و همکاران [۱۳] مدلی از نوع برنامه ریزی عدد صحیح مختلط (MILP) برای طراحی شبکه زنجیره تأمین پایدار در شرایط عدم قطعیت پیشنهاد کرده اند. این مدل با رویکردی دوهدفه تدوین شده است که اهداف مدیریت و کاهش انتشار گازهای گلخانه ای (GHG) و بهینه سازی هزینه کل زنجیره تأمین را به طور همزمان مدنظر قرار می دهد. نوآوری مقاله در ادغام قیود زیست محیطی با اهداف اقتصادی و در نظر گرفتن نوسانات پارامترهای کلیدی سیستم همچون تقاضا، ظرفیت های تولید و هزینه های حمل و نقل است. مدل پیشنهادی با تلفیق این عوامل، ابزاری فراهم می سازد که مدیران بتوانند تصمیم گیری های متوازن تری میان کارایی اقتصادی و پایداری زیست محیطی اتخاذ کنند. یافته های به دست آمده نشان می دهد که این چارچوب می تواند در تنظیم سیاست های انتشار گازهای گلخانه ای و بهبود اثربخشی تصمیمات طراحی شبکه زنجیره تأمین نقش بسزایی ایفا کند.

جوشی^۶ [۱۴] در یک مطالعه ی مروری جامع به بررسی و تبیین چارچوب طراحی پایدار شبکه زنجیره تأمین پرداخته است. این مقاله با مرور گسترده ی پژوهش های پیشین، ابعاد، پارادایم ها، مفاهیم و چارچوب های نظری مرتبط با طراحی شبکه زنجیره تأمین پایدار را یکپارچه سازی کرده و به شناسایی شاخص ها و پارامترهای کلیدی مؤثر بر این فرآیند می پردازد. تمرکز مقاله بر ترکیب سه بعد اصلی پایداری؛ اقتصادی، زیست محیطی و اجتماعی در طراحی شبکه است و ضمن تحلیل روندهای پژوهشی، شکاف های موجود در ادبیات موضوع را آشکار می سازد. نویسنده علاوه بر مرور مدل سازی های مختلف مورد استفاده در تحقیقات گذشته، بر اهمیت مدیریت عدم قطعیت ها، هم راستایی تصمیمات در سطوح استراتژیک، تاکتیکی و عملیاتی و همچنین توسعه ی روش های حل واقع گرایانه تر در

زیست محیطی و اجتماعی ارزیابی می شوند. سپس در مرحله ی دوم، با در نظر گرفتن عدم قطعیت ها و احتمال وقوع اختلالات مانند خرابی تأمین کننده یا تأخیر در تحویل، ترکیب بهینه ی انتخاب تأمین کنندگان به منظور تضمین تداوم و تاب آوری زنجیره تعیین می گردد. یافته های مقاله نشان می دهد که ادغام معیارهای پایداری با مدیریت ریسک اختلالات، رویکردی مؤثر برای ارتقای تاب آوری عملیاتی و پایداری عملکردی زنجیره های تأمین است. مرور ادبیات مرتبط نیز تأکید دارد که این هم گرایی، شرکت ها را قادر می سازد میان کارایی اقتصادی، مسئولیت اجتماعی زیست محیطی و مدیریت مخاطرات تعادلی پایدار و اثربخش برقرار سازند.

دهشیری^۱ و همکاران [۱۰] مدلی چندهدفه برای طراحی شبکه زنجیره تأمین حلقه بسته ارائه کرده اند که رویکردی ترکیبی از بهینه سازی تصادفی، فازی و مقاوم را به کار می گیرد. هدف این مدل، بهبود همزمان عملکرد اقتصادی، زیست محیطی و اجتماعی زنجیره تأمین است، به گونه ای که در برابر انواع عدم قطعیت ها و ریسک های احتمالاتی و فازی پایداری خود را حفظ کند. در این پژوهش، با تلفیق سه رویکرد اصلی یعنی برنامه ریزی مقاوم، تصادفی و فازی، چارچوبی چندبعدی و انعطاف پذیر طراحی شده است که توانایی پاسخ گویی به نوسانات تقاضا، تغییرات قیمت، نرخ بازگشت محصولات و محدودیت های زیست محیطی را دارد. مرور ادبیات مقاله نشان می دهد که مدل های پیشین عمدتاً تنها به یک نوع عدم قطعیت پرداخته اند و فاقد انعطاف لازم برای مواجهه با تغییرات محیطی بوده اند. در مقابل، ترکیب چندگانه ی پیشنهادی، راهکاری مؤثر برای طراحی زنجیره های تأمین پیچیده و پایدار فراهم می کند که در برابر اختلالات، نوسانات و تغییرات غیرقطعی محیطی، از پایداری و کارایی عملکردی بالایی برخوردارند.

چراغعلی پور^۲ و فرساد^۳ [۱۱] به بررسی مسأله انتخاب تأمین کننده پایدار و تخصیص سفارش با رویکردی دوهدفه پرداخته اند که همزمان اهداف اقتصادی و ابعاد زیست محیطی - اجتماعی پایداری را در نظر می گیرد. نوآوری این پژوهش در ادغام تخفیف های مبتنی بر مقدار سفارش با ریسک اختلال در زنجیره تأمین است؛ به گونه ای که ترکیب این دو عامل در قالب یک مدل بهینه سازی دوهدفه جامع صورت گرفته است. مدل پیشنهادی ضمن کاهش هزینه کل، به افزایش سطح پایداری و تاب آوری زنجیره کمک می کند. مرور ادبیات مقاله نشان می دهد که اغلب پژوهش های پیشین تنها یکی از این دو جنبه تخفیف های حجمی یا ریسک اختلال را به طور مستقل در نظر گرفته اند. بررسی موردی انجام شده در صنعت پلاستیک نشان داده است که به کارگیری این چارچوب می تواند انعطاف پذیری، پایداری و کارایی زنجیره تأمین را به میزان قابل توجهی افزایش داده و استراتژی های سفارش دهی بهینه تر و مقاوم تری فراهم سازد.

ماری^۴ و همکاران [۱۲] به طراحی شبکه زنجیره تأمین پایدار و

4. Mari
5. Kumar
6. Joshi

1. Dehshiri
2. Cheraghali pour
3. Farsad

محیط‌های صنعتی واقعی تأکید دارد. این چارچوب مرجع می‌تواند به‌عنوان نقشه راه پژوهشی برای توسعه‌ی آینده‌ی مفاهیم پایداری در طراحی شبکه زنجیره‌تأمین مورد استفاده قرار گیرد.

روئیز-تورس^۱ و همکاران [۱۵] مدلی را برای بهینه‌سازی همزمان دو تصمیم کلیدی؛ تعیین ظرفیت قراردادی تأمین‌کننده قطعات جدید و میزان مشوق‌های مالی برای منابع بازگشت کالا؛ در زنجیره‌تأمین حلقه‌بسته ارائه داده‌اند. در این مدل، جریان‌های پیشرو (قطعات نو) و جریان‌های معکوس (قطعات بازگشتی برای بازسازی) به‌صورت همزمان و در حضور عدم قطعیت کیفیت و کمیت بازگشت‌ها و همچنین احتمال شکست در تأمین قطعات نو مدل‌سازی شده‌اند. اهداف اصلی مدل شامل حداقل‌سازی هزینه کل زنجیره‌تأمین است که دربرگیرنده‌ی هزینه‌های تأمین، بازتولید، مشوق‌های مالی و هزینه‌های ناشی از کمبود قطعه می‌باشد. روش حل مورد استفاده، رویکرد درخت تصمیم به همراه تحلیل حساسیت است تا اثر تغییر پارامترهایی نظیر سطح ریسک تأمین، نوسانات بازگشت کالا و هزینه‌های مرتبط بر تصمیمات ظرفیت و مشوق‌ها ارزیابی گردد. نتایج نشان می‌دهد که با افزایش احتمال شکست تأمین‌کننده یا نوسانات بازگشت‌ها، سطح بهینه مشوق‌ها و ظرفیت قراردادی تغییر می‌کند و میان هزینه‌های کمبود، ساختار هزینه‌ای تأمین و سیاست‌های تشویقی رابطه‌ای معنادار و متقابل وجود دارد. این دستاوردها بینشی کاربردی برای تصمیم‌سازی در مدیریت همزمان تأمین و لجستیک معکوس فراهم می‌آورند.

محمدپور^۲ و همکاران [۱۶] مدلی برای بهینه‌سازی زیست‌محیطی شبکه زنجیره‌تأمین ترکیبی (پیشرو و معکوس) تحت شرایط عدم قطعیت ارائه کرده‌اند. در حالی که بسیاری از مطالعات پیشین، طراحی زنجیره‌تأمین پیشرو و معکوس را به‌صورت مجزا بررسی کرده‌اند، این پژوهش با رویکردی یکپارچه به ترکیب آن‌ها در قالب یک چارچوب چندهدفه و سناریو محور پرداخته است. مدل پیشنهادی به‌طور همزمان به دنبال حداقل‌سازی هزینه‌های کل سیستم و کاهش انتشار کربن است و عدم قطعیت در پارامترهایی همچون تقاضا، نرخ بازگشت و هزینه‌های عملیاتی را در قالب سناریوهای محتمل مدل‌سازی می‌کند. نوآوری مقاله در ادغام بهینه‌سازی سناریو محور با رویکرد چندهدفه زیست‌محیطی-اقتصادی است که توانسته است شکاف میان طراحی شبکه اقتصادی و طراحی پایدار را تا حد زیادی برطرف سازد. یافته‌ها نشان می‌دهد که استفاده از این مدل باعث می‌شود تصمیم‌گیرندگان بتوانند میان دو هدف گاه متعارض کارایی اقتصادی و سازگاری زیست‌محیطی، موازنه‌ای واقع‌گرایانه برقرار کنند. به این ترتیب، چارچوب پیشنهادی این پژوهش گامی مؤثر در جهت طراحی شبکه زنجیره‌تأمین یکپارچه، مقاوم و پایدار در محیط‌های نامطمئن است.

الیزاده^۳ و همکاران [۱۷] مدلی یکپارچه چندمحصولی و

چنددوره‌ای برای طراحی شبکه زنجیره‌تأمین حلقه بسته پایدار و تاب‌آور در بخش کشاورزی- غذایی ارائه کرده‌اند که به‌طور خاص بر محصولات گوشتی تمرکز دارد. برخلاف بسیاری از پژوهش‌های پیشین که بخش‌های پیشرو (تولید و توزیع) و معکوس (مدیریت ضایعات و بازیافت) را به‌صورت جداگانه تحلیل کرده‌اند، این مطالعه با دیدگاهی سیستمی و کل‌نگر، هر دو را در یک مدل واحد تلفیق می‌کند. چارچوب پیشنهادی شامل مراحل تولید، فرآوری، توزیع و مدیریت پسماند بوده و بر پایه‌ی اصول اقتصاد چرخشی و اهداف توسعه پایدار (SDGs) طراحی شده است. هدف مدل، کمینه‌سازی ارزش فعلی خالص کل هزینه‌ها (NPV) است و برای حل مؤثر مسأله، مجموعه‌ای از الگوریتم‌های متاهوریستیک هیبریدی به کار گرفته شده است. مطالعه‌ی موردی انجام شده در ایالت سونورا مکزیک با ۱۴ سناریوی آزمایشی نشان داد که در ۸۶٪ موارد، الگوریتم H_KASA بهترین عملکرد را نسبت به سایر روش‌ها از نظر مقدار تابع هدف ارائه داده است. تحلیل حساسیت نیز بیانگر تأثیر قابل توجه متغیرهایی مانند ظرفیت تولید و سطح تقاضا بر هزینه‌های کل شبکه بود (افزایش ۵۰٪ در این عوامل موجب تغییر بیش از ۲۰٪ در هزینه‌ها شد). نتایج این تحقیق اثبات می‌کند که طراحی شبکه‌های حلقه بسته‌ی یکپارچه در صنایع غذایی، علاوه بر کاهش ضایعات و مصرف منابع، می‌تواند منجر به افزایش بهره‌وری، تاب‌آوری و پایداری سیستم غذایی گردد. نخعی نژاد و همکاران [۱۸] به ارائه یک مدل بهینه‌سازی پرداختند که هزینه‌های انتشار کربن در حمل‌ونقل و نگهداری محصولات را با استفاده از وسایل نقلیه ناهمگن در نظر می‌گیرد. مدل آن‌ها به ترکیب تصمیمات مربوط به موجودی و حمل‌ونقل با در نظر گرفتن هزینه‌های زیست‌محیطی و اقتصادی پرداخته و هدف آن بهینه‌سازی مصرف انرژی و مدیریت منابع در زنجیره‌تأمین است. آن‌ها به توسعه و تحلیل یک مدل بهینه‌سازی در زنجیره‌تأمین سبز چندمحصولی و چنددوره‌ای پرداخته‌اند که با هدف کاهش انتشار کربن طراحی شده است.

حمدی اصل و همکاران [۱۹] در مقاله‌ای یک مدل شبکه زنجیره‌تأمین براساس ویژگی‌های منحصربه‌فرد محصول خرما ایجاد کردند. در این شبکه حلقه بسته، پایداری محصول خرما در شبکه زنجیره‌تأمین مورد بررسی قرار گرفته است. همچنین در این مدل جمع‌آوری پسماند محصولات به مراکز بازیافت معرفی گردیده و برای حل مدل پیشنهادی مسأله، مجموعه‌ای از الگوریتم‌های فراابتکاری و ترکیبی با استفاده از سالور سیپلکس استفاده شده است. مدل ارائه شده با بهینه‌سازی جریان روبه جلو و معکوس، هزینه‌های کل لجستیک و سبز بودن ناشی از انتشارات را به حداقل می‌رساند. عبدالله‌زاده و عاصم فرزانه [۲۰] برای اولین بار یک مدل بهینه‌سازی ریاضی به منظور کاربرد مفهوم همزیستی صنعتی در ارائه زنجیره‌تأمین سبز با هدف حداقل کردن هزینه‌های کل با حداقل

تاب آور و پایدار برای تولید مواد شیمیایی خاص از گلوکز (زیست توده) با استفاده از فرآیند نوآورانه الکتروشیمی سبز می پردازد. فرآیند تولید شامل چندین مرحله فنی (B) است که در هر مرحله، گلوکز تحت واکنش های الکتروشیمی قرار گرفته و به محصول نهایی تبدیل می شود. این تبدیل با یک ضریب بازده (α) همراه است که مقدار محصول خروجی را به میزان گلوکز ورودی مرتبط می سازد. علاوه بر جریان مواد، فرآیند نیازمند مصرف انرژی الکتریکی در هر مرحله و مدیریت پساب های تولیدی (دورریز آب) است. چالش اصلی، مقابله با عدم قطعیت و ریسک اخلاقی در تأمین کنندگان اولیه است که می تواند جریان مواد اولیه را مختل کرده و کل زنجیره را با خطر مواجه کند. برای مدیریت این ریسک، مدل به دنبال اتخاذ تصمیمات مناسب در یک محیط نامشخص است.

این مسأله در قالب یک مدل تصادفی دومرحله ای فرموله شده است.

- تصمیمات مرحله اول (استراتژیک): این تصمیمات قبل از وقوع هرگونه اخلاقی گرفته می شوند. این تصمیمات شامل مکان یابی و تعیین ظرفیت مناسب برای تأسیسات تولیدی و همچنین انتخاب و عقد قرارداد با تأمین کنندگان ثانویه (پشتیبان) به منظور افزایش تاب آوری شبکه است.
- تصمیمات مرحله دوم (عملیاتی): پس از مشخص شدن وضعیت شبکه تحت یک سناریوی اخلاقی خاص (مثلاً از کار افتادن تعدادی از تأمین کنندگان اولیه)، تصمیمات عملیاتی گرفته می شود. این تصمیمات شامل تعیین جریان بهینه مواد، مقدار تولید در هر تأسیسات و نحوه تأمین تقاضا با استفاده از منابع باقی مانده (تأمین کنندگان اولیه فعال و تأمین کنندگان ثانویه) است.

انتشار کرین کردند. مدل پیشنهادی تک کالایی و چنددوره ای بوده است. با حل مدل، یک برنامه تولید و بازتولید محصول با حداقل هزینه کل و کمترین تولید کرین به تفکیک هر کارخانه تعیین شد. همچنین، اطلاعات کلیدی عملکردی کارخانه ها در دوره های برنامه ریزی محاسبه شد.

با وجود پژوهش های متعدد در حوزه طراحی زنجیره های تأمین پایدار و تاب آور (جدول (۱))، شکاف قابل توجهی در ادغام همزمان این دو پارادایم، به ویژه در بستر نوظهور تولید مواد شیمیایی سبز مبتنی بر فناوری الکتروشیمی، احساس می شود. بسیاری از مدل های پیشین یا بر پایداری و یا بر تاب آوری به صورت مجزا تمرکز کرده اند و کمتر مدلی به ارائه یک چارچوب بهینه سازی تصادفی پرداخته است که عدم قطعیت ناشی از اخلاقی در تأمین کنندگان را با یک راهکار استراتژیک مشخص (مانند استفاده از تأمین کنندگان ثانویه) مدیریت کند و همزمان به بهینه سازی دو هدف متضاد اقتصادی (هزینه) و زیست محیطی (انتشار گازهای گلخانه ای) بپردازد. این پژوهش با هدف پر کردن این شکاف، یک مدل تصادفی دو مرحله ای برای طراحی شبکه ای ارائه می دهد که به طور یکپارچه کارایی اقتصادی، پایداری زیست محیطی و تاب آوری در برابر اخلاقی را در نظر می گیرد.

۳. تعریف مسأله

در دهه اخیر، به دلیل چالش های متعدد اقتصادی، اجتماعی و زیست محیطی، رویکردهای سنتی که تنها بر مشتری مداری و رضایت مشتریان متمرکز بوده اند، نتوانستند مزیت رقابتی پایداری ایجاد کنند. این دیدگاه های محدود منجر به آسیب های زیست محیطی شده و تولید محصولات و فرآیندهایی را تشویق کرده اند که با اصول زیست محیطی هماهنگی نداشته اند [۲۱]. همان طور که در بخش مقدمه اشاره شد این تحقیق به طراحی یک شبکه زنجیره تأمین

جدول (۱). مقایسه پژوهش حاضر با سایر پژوهش های مرتبط

ردیف	محققین (سال)	پایداری	تاب آوری	رویکرد تصادفی	عدم قطعیت اخلاقی تأمین کنندگان	صنعت مواد شیمیایی سبز
۱	انجم شعاع و همکاران [۱]	✓	✓	✓	✓	
۲	جبارزاده و همکاران [۲]	✓	✓		✓	
۳	بیلگن و همکاران [۳]	✓		✓		
۴	سلطانی و همکاران [۵]	✓		✓		
۵	مجددقیقی [۶]	✓	✓	✓		
۶	روی و همکاران [۷]		✓	✓		
۷	سبوحی و همکاران [۸]	✓	✓			
۸	لو و همکاران [۹]	✓	✓	✓	✓	
۹	دهشیری و همکاران [۱۰]	✓	✓			
۱۰	چراغعلی پور و فرساد [۱۱]	✓	✓		✓	
۱۱	ماری و همکاران [۱۲]	✓	✓			
۱۲	روبیخ-تورس و همکاران [۱۵]				✓	
۱۳	الیزاده و همکاران [۱۷]	✓	✓			
۱۴	نخعی نژاد و همکاران [۱۸]	✓				
۱۵	پژوهش حاضر	✓	✓	✓	✓	✓

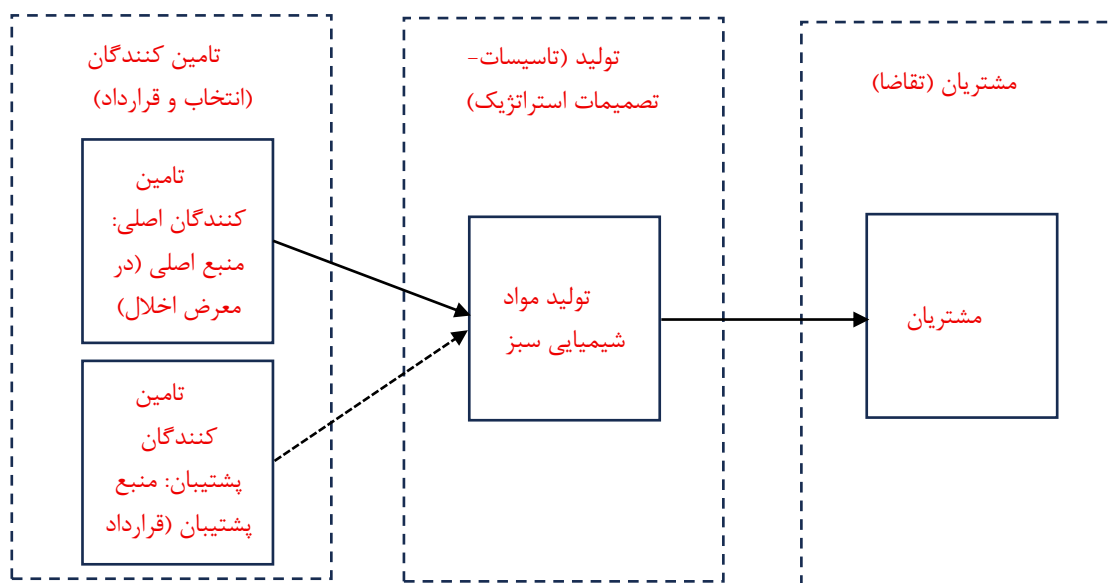
مدل دارای دو هدف متضاد است:

- (۱) به حداقل رساندن مجموع هزینه‌های مورد انتظار سیستم: شامل هزینه‌های سرمایه‌گذاری (که با استفاده از نرخ تنزیل به هزینه سالانه معادل تبدیل شده‌اند)، هزینه‌های عقد قرارداد با تأمین‌کنندگان پشتیبان و هزینه‌های عملیاتی (تولید، حمل‌ونقل و ...) تحت سناریوهای مختلف.
 - (۲) به حداقل رساندن مجموع انتشارات گازهای گلخانه‌ای مورد انتظار: ناشی از حمل‌ونقل و مصرف برق در کل شبکه.
 - (۳) هدف نهایی، ارائه یک ساختار مناسب برای زنجیره تأمین است که نه تنها از نظر اقتصادی و زیست‌محیطی کارآمد باشد، بلکه بتواند در برابر اختلالات احتمالی در بخش تأمین نیز مقاومت و تاب‌آوری از خود نشان دهد.
- شکل (۱) ساختار مفهومی شبکه زنجیره تأمین پیشنهادی را به تصویر می‌کشد. همان‌طور که مشاهده می‌شود، این شبکه شامل سه لایه اصلی تأمین، تولید و توزیع است. لایه تأمین شامل تأمین‌کنندگان اولیه که در معرض ریسک اخلاقی هستند و تأمین‌کنندگان ثانویه (پشتیبان) است که به عنوان راهکار تاب‌آوری در مرحله اول انتخاب می‌شوند. جریان مواد از این لایه‌ها به تأسیسات تولیدی وارد شده و محصول نهایی به مشتریان ارسال می‌گردد.

۳-۱. مفروضات مدل

- ساختار شبکه: مکان‌های کاندید برای احداث تأسیسات، مکان تأمین‌کنندگان اولیه و ثانویه و همچنین مراکز مشتریان از پیش مشخص و شناخته شده هستند.
- ماهیت اخلاقی: اخلاقیات تنها بر ظرفیت تأمین‌کنندگان اولیه تأثیر می‌گذارند. فرض بر این است که تأسیسات تولیدی و تأمین‌کنندگان ثانویه دچار اخلاقیات نمی‌شوند.
- سناریوهای تصادفی: مجموعه‌ای متناهی از سناریوهای اخلاقی در نظر گرفته می‌شود که هر کدام احتمال وقوع مشخصی دارند.

- ظرفیت باقی‌مانده تأمین‌کنندگان اولیه در هر سناریو مشخص است.
- تأمین‌کنندگان ثانویه: برای استفاده از ظرفیت یک تأمین‌کننده ثانویه، باید در مرحله اول با پرداخت یک هزینه ثابت، با او قرارداد بسته شود. این تأمین‌کنندگان به عنوان منابع پشتیبان عمل کرده و در دسترس بودن آن‌ها تضمین شده است.
 - تأمین تقاضا: تقاضای تمام مراکز مشتریان باید تحت هر سناریوی اخلاقی به طور کامل برآورده شود.
 - قطعیت تقاضا و قیمت: با وجود اینکه در محیط‌های واقعی، تقاضا و قیمت‌ها نیز دارای نوسان هستند، در این مدل پارامترهای تقاضا (D_k) و قیمت‌ها (هزینه‌ها) به صورت قطعی در نظر گرفته شده‌اند. دلیل این امر، تفکیک دو نوع عدم قطعیت است: (۱) عدم قطعیت اخلاقی که منجر به قطع جریان مواد می‌شود و (۲) عدم قطعیت عملیاتی مانند نوسان روزمره تقاضا. از آنجا که تمرکز اصلی این پژوهش بر طراحی شبکه‌ای تاب‌آور در برابر «اختلالات شدید تأمین‌کنندگان» است و افزودن همزمان عدم قطعیت تقاضا باعث پیچیدگی بیش از حد سناریوها و انحراف تمرکز از استراتژی‌های مقابله با اخلاقیات می‌گردد، تقاضا بر اساس پیش‌بینی‌های میانگین و قیمت‌ها بر اساس هزینه‌های استاندارد وارد مدل شده‌اند. این رویکرد امکان ارزیابی خالص اثرات اخلاقی تأمین بر تصمیمات استراتژیک (مانند انتخاب تأمین‌کننده پشتیبان) را فراهم می‌کند.
 - پارامترهای فنی: نرخ‌های انتشار گازهای گلخانه‌ای و پارامترهای فنی (مانند میزان گلوکز مورد نیاز برای تولید و برق مصرفی) مقادیر ثابت و معینی هستند. عدم قطعیت تنها در ظرفیت تأمین‌کنندگان اولیه مدل‌سازی شده است.
 - ظرفیت تأسیسات: برای هر مکان کاندید، تنها یک سطح ظرفیت از میان سطوح ظرفیت ممکن می‌تواند انتخاب شود.



شکل (۱). ساختار شبکه زنجیره تأمین پیشنهادی

• پارامترهای انرژی: فرض بر این است که هزینه متغیر برق و ضریب انتشار گازهای گلخانه‌ای ناشی از آن در طول دوره برنامه‌ریزی ثابت هستند و از مقادیر میانگین (یا نماینده سالانه) استفاده می‌شود. نوسانات کوتاه مدت و ساعتی قیمت برق در این مدل استراتژیک لحاظ نشده است.

۳-۲. اندیس ها و پارامترها

در این قسمت اندیس ها و پارامترهای مسئله ارائه می‌شود.

مجموعه‌ها:

J	نقاط کاندید برای احداث تسهیلات
K	مراکز مصرف کنندگان
C	مقادیر ظرفیت
M	تأمین کنندگان اولیه گلوکوز
	مجموعه مراحل فرآیندی تولید مواد شیمیایی (مثلاً
B	مرحله آماده‌سازی سوخت، مرحله واکنش الکتروشیمی، مرحله خالص‌سازی)
I	تأمین کنندگان ثانویه گلوکوز
S	سناریوهای تصادفی اخلال در تأمین کنندگان

پارامترهای مسئله

D_k	مقدار تقاضای سالانه مواد شیمیایی در مرکز مصرف کننده k (واحد: تن در سال)
r	نرخ جذب سرمایه
N	عمر تسهیلات
β	مقدار گلوکوز (زیست‌توده) مورد نیاز برای تولید یک واحد محصول نهایی (واحد: تن گلوکوز / تن محصول). این پارامتر معکوس ضریب بازده فرآیند است.
α	ضریب بازده تبدیل مواد در فرآیند تولید؛ این ضریب مشخص می‌کند که از هر واحد گلوکز ورودی، چه مقدار محصول نهایی قابل تولید است (واحد: بدون بعد/ درصد).

π_s احتمال رخداد سناریوی اخلال s

U_c ظرفیت تسهیلات در سطح c

S_m^s ظرفیت تأمین کننده m

W^b برق مورد نیاز در مرخل b

d_{uv} فاصله بین دو نقطه u و v

$V_{gi(j)}$ هزینه تأمین گلوکز از تأمین کننده i

هزینه اولیه خرید و نصب تجهیزات برای مرحله تولید b در مکان کاندید j با ظرفیت c (واحد: واحد پول). این هزینه شامل هزینه‌های ساخت‌وساز و ماشین‌آلات است.

هزینه پردازش یا دفع پساب و دورریز آب به ازای هر واحد محصول تولیدی در مکان j (واحد: واحد پول/ تن محصول).

V_j^w

V_j^L هزینه نیروی کار مستقیم تولید به ازای هر واحد محصول تولید شده در مکان j (واحد: واحد پول/ تن محصول). این هزینه متناسب با حجم تولید است.

هزینه سالانه کارگران در تسهیل نقطه j با ظرفیت c در صورت بهره‌برداری کامل

O_{jc}^L هزینه ثابت سالانه نیروی کار (پرسنل اداری و نظارتی) در تسهیل j با ظرفیت c در صورت بهره‌برداری کامل (واحد: واحد پول/ سال).

$V_j^{UT.b}$ هزینه بهره‌برداری بدون برق متغیر در مرحله b و در نقطه j

R_j هزینه متغیر برق در نقطه j (براساس میانگین هزینه انرژی در دوره برنامه‌ریزی)

T_{uv} هزینه حمل‌ونقل از u به نقطه v

ضریبی برای تبدیل هزینه سرمایه‌گذاری اولیه به هزینه سالانه معادل. این ضریب هزینه‌های سالانه نگهداری، تعمیرات، بیمه و مالیات را که بخشی از هزینه‌های ثابت عملیاتی هستند، دربر می‌گیرد (محاسبه شده براساس نرخ تنزیل و عمر مفید).

$\emptyset_2$ ضریب هزینه سالانه نیروی کار برای در نظر گرفتن هزینه‌های سالانه اداری و بخشی از سربار کارخانه

$\emptyset_3$ ضریب هزینه متغیر نیروی کار برای در نظر گرفتن نیروی کار نظارتی و دفتری و همچنین هزینه‌های آزمایشگاهی

E_j^G انتشار گازهای گلخانه‌ای ناشی از تولید برق مصرف‌شده در محل j

E^T انتشار گازهای گلخانه‌ای ناشی از حمل‌ونقل

$g_i(j)$ هزینه ثابت بستن قرارداد با تأمین کنندگان

M یک عدد خیلی بزرگ

۳-۳. تبدیل هزینه‌های سرمایه‌گذاری به هزینه سالانه

جهت یکسان‌سازی افق زمانی تصمیمات استراتژیک و عملیاتی، هزینه‌های ثابت سرمایه‌گذاری اولیه (K_{jc}^b) با استفاده از ضریب هزینه سرمایه‌گذاری ($\emptyset_1$) به هزینه‌های سالانه معادل تبدیل شده‌اند. این ضریب تابعی از نرخ جذب سرمایه (r) و عمر مفید تسهیلات (N) است و براساس فرمول بازپرداخت سالانه محاسبه می‌شود. بدین ترتیب، تمامی هزینه‌های مدل در قالب «هزینه سالانه» مقایسه و جمع می‌شوند.

متغیرهای مرحله اول

متغیر باینری برابر با یک در صورتی که نقطه j در سطح c برای احداث تسهیل انتخاب شود و صفر در غیر اینصورت

t_{jc} متغیر باینری اگر با تأمین کننده ثانویه i قرارداد بسته شود.

Z_i

متغیرهای مرحله دوم

x_{uv}^s : مقدار انتقال ماده از u به v تحت سناریوی s

y_j^s : مقدار ماده تولید شده در j تحت سناریوی s

f_j^s : مقدار برق استفاده شده در نقطه j تحت سناریوی s

۳-۴. روابط ریاضی مسأله

$$\begin{aligned} \text{Min } Z1 &= \sum_s \pi_s \left[\left(\frac{r(1+r)^N}{(1+r)^N - 1} \right) \sum_c \sum_j \sum_b k_{jc}^b \right. \\ &+ \sum_j \left(\sum_b V_g + V_j^w + V_j^{UT,b} + (1 \right. \\ &+ \Phi_3) V_j^L \left. \right) y_j^s + \sum_m \sum_j T_{mj} d_{mj} x_{mj}^s \\ &+ \sum_j \sum_k T_{jk} d_{jk} x_{jk}^s \\ &+ \sum_j R_j f_j^s \left. \right] + \sum_c \sum_j \left(\sum_b \Phi_1 K_{jc}^b \right. \\ &+ \Phi_2 O_{jc}^L \left. \right) t_{jc} + \sum_{i(j)} g_i(j) Z_{i(j)} \end{aligned} \quad (1)$$

$$\begin{aligned} \text{Min } Z2 &= \sum_s \pi_s \left(E^T \sum_j \sum_m d_{mj} x_{mj}^s \right. \\ &+ \sum_j E_j^G f_j^s \\ &+ E^T \sum_k \sum_j d_{jk} x_{jk}^s \left. \right) \end{aligned} \quad (2)$$

$$\sum_v x_{i(m)v}^s \leq MM \cdot Z_{i(m)} \quad \forall s, i(m) \quad (3)$$

$$\sum_j x_{jk}^s \geq D_k \quad \forall k \quad (4)$$

$$\sum_k x_{jk}^s = y_j^s \quad \forall s, j \quad (5)$$

$$\sum_k x_{mj}^s = \alpha y_j^s \quad \forall s, j \quad (6)$$

$$\sum_j f_j^s = \sum_b w_j^b y_j^s \quad \forall s, j \quad (7)$$

$$y_j^s \leq \sum_c U_c t_{jc} \quad \forall s, j \quad (8)$$

$$\sum_c t_{jc} \leq 1 \quad \forall j \quad (9)$$

$$\sum_j x_{mj}^s \leq S_m^s \quad \forall s, m \quad (10)$$

رابطه اول تابع هدف مدل را معرفی می‌کند که به دنبال بهینه‌سازی هزینه‌ها است. این تابع کل هزینه‌های سالانه مورد انتظار سیستم را به حداقل می‌رساند. جهت اعتبار مقایسه اقتصادی، هزینه‌های استراتژیک احداث تأسیسات با استفاده از ضریب هزینه سرمایه‌گذاری (ϕ_1) به جریان‌های نقدی سالانه معادل تبدیل شده‌اند و سپس با هزینه‌های عملیاتی (مانند تولید و حمل‌ونقل) جمع شده‌اند.

رابطه اول تابع هدف مدل را معرفی می‌کند که به دنبال بهینه‌سازی هزینه‌ها است. این تابع کل هزینه‌های سالانه مورد انتظار سیستم را به حداقل می‌رساند. جهت اعتبار مقایسه اقتصادی، هزینه‌های استراتژیک احداث تأسیسات با استفاده از ضریب هزینه سرمایه‌گذاری (α) به جریان‌های نقدی سالانه معادل تبدیل شده‌اند و سپس با هزینه‌های عملیاتی (مانند تولید و حمل‌ونقل) جمع شده‌اند.

رابطه دوم به مینیمم‌سازی اثرات زیست‌محیطی اختصاص دارد. هدف این رابطه، کمینه کردن کل ردپای کربنی زنجیره تأمین است که از دو منبع عمده ناشی می‌شود: آلاینده‌گی حاصل از حمل‌ونقل در سراسر شبکه و آلاینده‌گی ناشی از تولید برق مصرفی در فرآیندهای تولیدی داخل تأسیسات.

محدودیت‌های مدل از رابطه سوم آغاز می‌شوند. رابطه سوم فعال‌سازی جریان از تأمین‌کنندگان پشتیبان را کنترل می‌کند و تضمین می‌نماید که جریان مواد اولیه تنها از تأمین‌کنندگان ثانویه‌ای ممکن است که در مرحله اول برای عقد قرارداد انتخاب شده‌اند. این شرط، فعال‌سازی مسیرهای پشتیبان در زمان نیاز را منطقی و قابل کنترل می‌سازد. رابطه چهارم بر برآورده‌سازی کامل تقاضا تمرکز دارد و مدل را ملزم می‌کند که تحت هر سناریوی اخلال، تمامی نیاز مراکز مصرف‌کننده را تأمین کند؛ حتی در شرایط بحرانی، تا سطح خدمت‌رسانی و پایداری به تعهدات حفظ شود. رابطه پنجم توازن جریان خروجی از تأسیسات را تضمین می‌کند؛ این رابطه با یک معادله توازن مشخص می‌کند که مجموع محصول نهایی ارسال شده از یک تأسیسات باید دقیقاً برابر با مقدار محصول تولید شده در همان تأسیسات باشد و بدین ترتیب از اختلاف بین تولید و توزیع جلوگیری می‌شود. رابطه ششم به توازن مواد و بازده تولید می‌پردازد و با استفاده از ضریب بازده فرآیند (α)، مقدار تولید محصول نهایی را به میزان گلوکز ورودی مرتبط می‌کند تا اصول پایداری جرم در فرآیند تولید رعایت شود. رابطه هفتم مصرف برق مصرفی را متناسب با حجم تولید در هر تأسیسات محاسبه کرده و نتایج آن را به عنوان ورودی در محاسبه هزینه‌های عملیاتی و میزان انتشار گازهای گلخانه‌ای استفاده می‌کند. رابطه هشتم سقف ظرفیت تولید را کنترل نموده و مانع از آن می‌شود که تولید هر تأسیسات از ظرفیت اسمی انتخاب شده در مرحله اول فراتر رود. این رابطه تصمیمات عملیاتی مرحله دوم را به ساختار تصمیمات استراتژیک مرحله اول پیوند می‌دهد. رابطه نهم انتخاب یک سطح ظرفیت منحصربه‌فرد برای هر مکان کاندید را الزامی می‌کند و اجازه نمی‌دهد ترکیبی از ظرفیت‌ها برای یک مکان انتخاب شود. بنابراین هر مکان یا فاقد تأسیسات است یا تنها با یک ظرفیت مشخص ساخته می‌شود. نهایتاً رابطه دهم محدودیت ظرفیت تأمین‌کنندگان را تحت شرایط اخلال مدل‌سازی می‌کند و حجم گلوکز دریافتی از هر تأمین‌کننده را به ظرفیت باقی‌مانده و در دسترس آن تأمین‌کننده در هر سناریوی اخلال محدود می‌سازد، تا اثر مستقیم هر سناریوی تصادفی بر توانایی تأمین مواد اولیه به دقت منعکس

شود.

مستقیم و شفاف در مدل لحاظ گردد.

مدل به صورت یک برنامه ریزی خطی عدد صحیح مختلط (MILP) فرموله شده و کلیه سناریوها به طور همزمان در آن لحاظ شده اند. توابع هدف مدل به صورت امپد ریاضی براساس نتایج سناریوها تعریف شده است تا اثرات عدم قطعیت در معیارهای عملکرد کل سیستم منعکس شود.

در فرآیند حل، دو تابع هدف (کمینه سازی هزینه کل مورد انتظار و کمینه سازی انتشار گازهای گلخانه ای مورد انتظار) با استفاده از روش ترکیب وزنی در یک تابع هدف واحد جمع شده و مدل با مجموعه ای از وزن های مختلف حل شده است. این کار امکان تولید نقاط پارتو و تحلیل مبادله بین اهداف اقتصادی و زیست محیطی را فراهم می سازد. نتایج حاصل، پایه ای برای بخش تحلیل حساسیت و بررسی عملکرد شبکه تحت شرایط و اولویت های متفاوت است.

مدل پیشنهادی این پژوهش یک مدل تصادفی دو مرحله ای است که به صورت یک برنامه ریزی خطی عدد صحیح مختلط فرموله شده است. ساختار این مدل بر پایه تفکیک تصمیمات به دو مرحله است: تصمیمات مرحله اول: این تصمیمات استراتژیک بوده و باید قبل از مشخص شدن سناریوی اخلاخل اتخاذ شوند. در این مدل، این تصمیمات شامل متغیرهای باینری t_{jc} (مکان یابی و تعیین ظرفیت تأسیسات) و Z_{ij} (عقد قرارداد با تأمین کنندگان پشتیبان) می باشند. تصمیمات مرحله دوم: این تصمیمات عملیاتی بوده و پس از آشکار شدن یک سناریوی اخلاخل خاص اتخاذ می شوند. متغیرهای مرحله دوم (مانند f_{ij}^s و y_{ij}^s ، x_{mz}^s) همگی وابسته به سناریوی s هستند. این تصمیمات براساس ظرفیت باقی مانده تأمین کنندگان S_m^s در آن سناریوی خاص بهینه می شوند.

۴-۱. نحوه مواجهه با عدم قطعیت در حل مدل

برای حل، مدل از فرم گسترده یا معادل قطعی استفاده می کند. در این رویکرد، تمامی سناریوهای گسسته s به طور همزمان در مدل لحاظ می شوند. توابع هدف (روابط (۱) و (۲)) به صورت مجموع هزینه های قطعی مرحله اول و ارزش مورد انتظار هزینه ها و انتشارات مرحله دوم تعریف شده اند.

از آنجایی که مدل دارای دو تابع هدف متضاد، Z_1 (کمینه سازی هزینه) و Z_2 (کمینه سازی انتشار) است، از روش ترکیب وزنی [۲۳] برای تجمع آن ها و یافتن جبهه پارتو استفاده شده است. برای این کار، یک تابع هدف واحد Z_{Total} به صورت زیر تعریف می شود:

$$\text{Min } Z_{Total} = \omega Z_1 + (1 - \omega) Z_2$$

که در آن ω یک پارامتر وزن دهی در بازه $0 \leq \omega \leq 1$ است.

از آنجا که Z_1 (هزینه) و Z_2 (انتشار گاز گلخانه ای) دارای واحدها و مقیاس های متفاوتی هستند، استفاده مستقیم از ترکیب وزنی می تواند منجر به غلبه هدفی با مقیاس بزرگتر شود. برای رفع این مشکل، قبل از تجمع، توابع هدف نرمال سازی می شوند. ابتدا، مقادیر ایده آل هر هدف با حل تک هدفه مدل به دست می آید:

$$\bullet Z_1^* \text{ با قرار دادن } \omega = 1$$

$$\bullet Z_2^* \text{ با قرار دادن } \omega = 0$$

۳-۵. محدودیت ها و فرضیات ساده ساز مدل

با وجود اینکه مدل پیشنهادی چارچوبی جامع برای تصمیم گیری در سطح استراتژیک فراهم می کند، اما برای حفظ قابلیت حل و تمرکز بر اهداف پژوهش، دارای محدودیت ها و فرضیات ساده کننده زیر است که در تفسیر نتایج باید مد نظر قرار گیرند:

(۱) مدیریت موجودی: در این مدل، سیاست «تولید برای سفارش» (Make-to-Order) در نظر گرفته شده و مدیریت موجودی انبار (Safety Stock) در مراکز تولید یا توزیع نادیده گرفته شده است. این فرض برای مدل سازی جریان مستقیم مواد و تمرکز بر تصمیمات مکان یابی اتخاذ شده است.

(۲) قطعیت تقاضا: تقاضای مشتریان به عنوان پارامتر قطعی در نظر گرفته شده است. اگرچه عدم قطعیت در تأمین کنندگان مدل شده، اما نوسانات تقاضای مشتریان در این نسخه از مدل لحاظ نگردیده است.

(۳) خطی سازی روابط: برای جلوگیری از پیچیدگی های محاسباتی ناشی از توابع غیر خطی، تمامی روابط هزینه (شامل هزینه های مقیاس اقتصادی) به صورت خطی یا خطی شده فرموله شده اند.

(۴) تک محصولی بودن: شبکه برای تولید یک نوع محصول خاص فرموله شده و اثرات هم تولیدی (Co-production) یا تنوع محصولی در نظر گرفته نشده است. این ساده سازی ها اجازه می دهد تا مدل به صورت یک برنامه ریزی خطی عدد صحیح مختلط (MILP) حل شود و بینش های استراتژیک کلیدی در مورد تاب آوری شبکه استخراج گردد.

۴. تشریح رویکرد حل مسأله

مدل پیشنهادی این پژوهش بر پایه روش تصادفی دو مرحله ای [۲۲] طراحی شده و به طور خاص، عدم قطعیت ناشی از اخلاخل در ظرفیت تأمین کنندگان اولیه را در فرآیند تصمیم گیری لحاظ می کند. در این ساختار، تصمیمات مرحله اول (استراتژیک) قبل از آشکار شدن نتایج تصادفی اتخاذ می شوند و شامل انتخاب مکان احداث تأسیسات تولیدی، تعیین سطح ظرفیت هر تأسیسات، و تصمیم گیری در مورد عقد قرارداد با تأمین کنندگان پشتیبان است. پس از وقوع یک سناریوی خاص از اخلاخل، مجموعه ای از تصمیمات مرحله دوم (عملیاتی) اخذ می شود که شامل تخصیص جریان مواد اولیه میان منابع موجود، تعیین میزان تولید در هر تأسیسات و برنامه ریزی ارسال محصولات به مراکز مصرف کننده است.

برای مدل سازی عدم قطعیت، مجموعه ای متناهی از سناریوهای گسسته تعریف شده است که هر سناریو وضعیت باقی مانده ظرفیت تأمین کنندگان اولیه را پس از وقوع رویداد اخلاخل توصیف می کند. به این سناریوها احتمال وقوع اختصاص داده شده که مبتنی بر داده های تاریخی یا برآوردهای کارشناسی است. استفاده از این رویکرد سناریو محور باعث می شود که اثرات واقعی اختلالات بر شبکه به شکل

معقول تولید شدند تا یک نمونه صنعتی فرضی را نمایندگی کنند. برای مثال، در حالت پایه، هزینه پایه عقد قرارداد با هر تأمین‌کننده پشتیبان ۱۵۰,۰۰۰ واحد پولی، هزینه پایه حمل و نقل ۴ میلیون واحد پولی و احتمال وقوع اخلاف عمده ۵ درصد در نظر گرفته شد. نمودارهای این بخش، نتایج حاصل از تغییر این پارامترها را حول مقادیر مبنای ذکر شده نشان می‌دهند.

۵-۱. نتایج عددی و تحلیل راه‌حل

پس از پیاده‌سازی مدل پیشنهادی روی مسأله نمونه و حل آن در پایتون، نتایج حاصل از وضعیت پایه استخراج گردید. در این وضعیت، وزن توابع هدف به‌گونه‌ای تنظیم شده است که توازن منصفانه میان اهداف اقتصادی و زیست‌محیطی برقرار شود. تحلیل نتایج عددی در دو سطح تصمیم‌گیری استراتژیک و عملیاتی ارائه می‌شود که بینش‌های ارزشمندی در مورد عملکرد مدل ایجاد می‌کند.

الف) تصمیمات استراتژیک (مرحله اول): نتایج نشان داد که مدل برای ایجاد تعادل میان هزینه و تاب‌آوری، تمایل به تمرکزگرایی در تولید دارد. براساس خروجی‌های مدل، از میان ۴ مکان کاندید برای احداث تأسیسات، ۲ تأسیسات (مکان‌های J2 و J4) برای احداث انتخاب شدند. ظرفیت انتخابی برای این تأسیسات به ترتیب در سطوح متوسط و بالا قرار گرفت که نشان‌دهنده تمایل مدل به ایجاد ظرفیت‌های ذخیره برای مواقع بحران است. درخصوص تأمین‌کنندگان، مدل با هدف کاهش ریسک اخلاف، تصمیم به عقد قرارداد با ۱ مورد از تأمین‌کنندگان ثانویه (پشتیبان) گرفت. اگرچه هزینه ثابت این قرارداد بر هزینه کل سیستم افزوده است، اما این سرمایه‌گذاری باعث شد تا در سناریوهای اخلاف، مدل بدون نیاز به جریمه‌های سنگین ناشی از کمبود مواد، بتواند تقاضا را پاسخ دهد. این نتیجه نشان می‌دهد که استراتژی «پیش‌گیری» (استفاده از تأمین‌کننده پشتیبان) در این شبکه از استراتژی «واکنش» (پرداخت هزینه‌های اضطراری) اقتصادی‌تر است.

ب) تصمیمات عملیاتی و تحلیل سناریوها (مرحله دوم): برای ارزیابی تاب‌آوری شبکه، رفتار مدل در سناریوهای مختلف اخلاف مورد بررسی قرار گرفت. جدول (۳) خلاصه‌ای از تخصیص جریان مواد در دو سناریوی حدی (سناریوی بدون اخلاف و سناریوی اخلاف شدید) را نشان می‌دهد.

سپس، تابع هدف تجمیعی نرمال‌شده به شکل زیر در هر بار حل مدل، مورد استفاده قرار می‌گیرد:

$$\text{Min } Z_{\text{Total}}^{\text{Norm}} = \omega \frac{Z_1 - Z_1^*}{Z_1} + (1 - \omega) \frac{Z_2 - Z_2^*}{Z_2}$$

با تغییر دادن سیستماتیک پارامتر ω (از ۰ به ۱ با گام‌های ۰/۱) و حل مکرر مسأله MILP حاصل، مجموعه‌ای از راه‌حل‌های بهینه پارتو تولید شده است. این راه‌حل‌ها توازن میان هزینه کل سیستم و میزان انتشار آلاینده‌ها را برای تصمیم‌گیرنده آشکار می‌سازند.

۵. تشریح مسأله نمونه و تحلیل حساسیت

در این بخش، مشخصات و ابعاد مسأله‌ی نمونه‌ای که مدل براساس آن حل شده است، تشریح می‌گردد. با توجه به نوپا بودن فناوری تولید مواد شیمیایی سبز از طریق فرآیند الکتروشیمی و عدم دسترسی عمومی به داده‌های مالی و عملیاتی دقیق صنایع فعال در این حوزه (که اغلب محرمانه هستند)، مدل پیشنهادی برای یک شبکه زنجیره‌تأمین فرضی اما واقع‌گرایانه با استفاده از داده‌های شبیه‌سازی‌شده اجرا شد. پارامترهای مسأله براساس بازه‌های استاندارد موجود در ادبیات زنجیره‌تأمین شیمیایی و با مشاوره خبرگان تعیین گردیدند تا نماینده‌ای معتبر از شرایط دنیای واقعی باشند. هدف اصلی در این مرحله، اعتبارسنجی رفتاری مدل و بررسی عملکرد الگوریتم حل در ابعاد مختلف است. ابعاد این مسأله نمونه در جدول (۲) خلاصه شده است.

جدول (۲). مشخصات و ابعاد مسأله نمونه

مجموعه (براساس مدل ریاضی)	شرح	تعداد (ابعاد)
M (مجموعه M)	تأمین‌کنندگان اولیه گلوکز	۵
I (مجموعه I)	تأمین‌کنندگان ثانویه (پشتیبان)	۳
J (مجموعه J)	مکان‌های کاندید احداث تأسیسات	۴
K (مجموعه K)	مراکز مصرف‌کننده (مشتری)	۱۰
S (مجموعه S)	سناریوهای اخلاف تصادفی	۵

سایر پارامترهای مدل مانند هزینه‌ها، تقاضای مشتریان، فواصل و ظرفیتهای اسمی، براساس توزیع‌های تصادفی یکنواخت در بازه‌های

جدول (۳). مقایسه تخصیص جریان مواد و تصمیمات عملیاتی در سناریوهای مختلف

پارامتر / سناریو	سناریوی «بدون اخلاف»	سناریوی «اخلاف شدید در تأمین‌کننده اصلی»
وضعیت تأمین‌کنندگان اولیه	تمام ظرفیت در دسترس	۴۰٪ ظرفیت تأمین‌کننده اصلی از دست رفته
فعال‌سازی تأمین‌کننده پشتیبان	خیر (جریان = ۰)	بله (تأمین ۳۰٪ از نیاز کل)
تغییر در الگوی حمل و نقل	استفاده از مسیرهای کوتاه‌تر و ارزان‌تر	افزایش مسافت حمل و نقل برای تأمین از پشتیبان
میزان تولید در تأسیسات J2	۱۰٪ ظرفیت	۹۵٪ ظرفیت
میزان تولید در تأسیسات J4	۸۰٪ ظرفیت	۱۰۰٪ ظرفیت (جبران کسری)

از هزینه تاب آوری.

(۲) احتمال وقوع اخلاص به عنوان معیاری از ریسک محیطی

(۳) هزینه های حمل و نقل به عنوان یکی از مؤلفه های اصلی هزینه های عملیاتی و زیست محیطی.

نتایج حاصل از این تحلیل، بینش های مدیریتی عمیق تری را برای درک بهتر توازن ها و اتخاذ تصمیمات استراتژیک در شرایط مختلف فراهم می کند.

نمودار شکل (۲) رابطه بین هزینه عقد قرارداد با تأمین کنندگان ثانویه (محور افقی) و دو متغیر کلیدی دیگر را نشان می دهد:

- هزینه کل مورد انتظار (خطوط ممتد): همان طور که مشاهده می شود، با افزایش هزینه قرارداد، هزینه کل سیستم نیز به صورت غیرخطی افزایش می یابد. این منطقی است زیرا سرمایه گذاری برای تاب آوری گران تر می شود و ریسک هزینه های ناشی از اخلاص نیز بالا می رود.

امتیاز تاب آوری (خطوط خط چین): این امتیاز که می تواند نمایانگر تعداد تأمین کنندگان پشتیبان باشد، با افزایش هزینه قرارداد به شدت کاهش می یابد. یعنی زمانی که تاب آوری پرهزینه باشد، مدل تمایل کمتری به آن نشان می دهد.

نمودار شکل (۳) نشان می دهد که با افزایش احتمال وقوع اخلاص در شبکه (محور افقی)، استراتژی بهینه چگونه تغییر می کند:

- هزینه کل مورد انتظار (خطوط ممتد): با بالا رفتن ریسک و احتمال اخلاص، هزینه کل مورد انتظار نیز افزایش می یابد. این افزایش به دلیل سرمایه گذاری بیشتر روی راهکارهای پیشگیرانه (تاب آوری) است تا از هزینه های بسیار بالاتر در زمان وقوع بحران جلوگیری شود.
- امتیاز تاب آوری (خطوط خط چین): به وضوح دیده می شود که با افزایش احتمال اخلاص، مدل به شکل منطقی تعداد تأمین کنندگان پشتیبان خود را افزایش می دهد تا شبکه را در برابر ریسک بالاتر محافظت کند.

همان طور که در جدول (۳) مشاهده می شود، در شرایط عادی (سناریوی بدون اخلاص)، مدل به دلیل هزینه های بالاتر تأمین کنندگان پشتیبان، ترجیح می دهد تمام مواد اولیه را از تأمین کنندگان اصلی تأمین کند. اما با وقوع سناریوی اخلاص شدید در تأمین کننده اصلی و کاهش ظرفیت تأمین کننده اصلی، مدل بلافاصله تأمین کننده پشتیبانی را که در مرحله اول قرارداد بسته شده بود، فعال می کند. جالب توجه است که مدل برای جبران کمبود ناشی از اخلاص، میزان تولید در تأسیسات دوم (J4) را به حداکثر ظرفیت خود رسانده است. این رفتار نشان دهنده انعطاف پذیری بالای شبکه طراحی شده است. **ج) مقادیر توابع هدف:** مقادیر بهینه حاصل از حل مدل در حالت پایه به شرح زیر است:

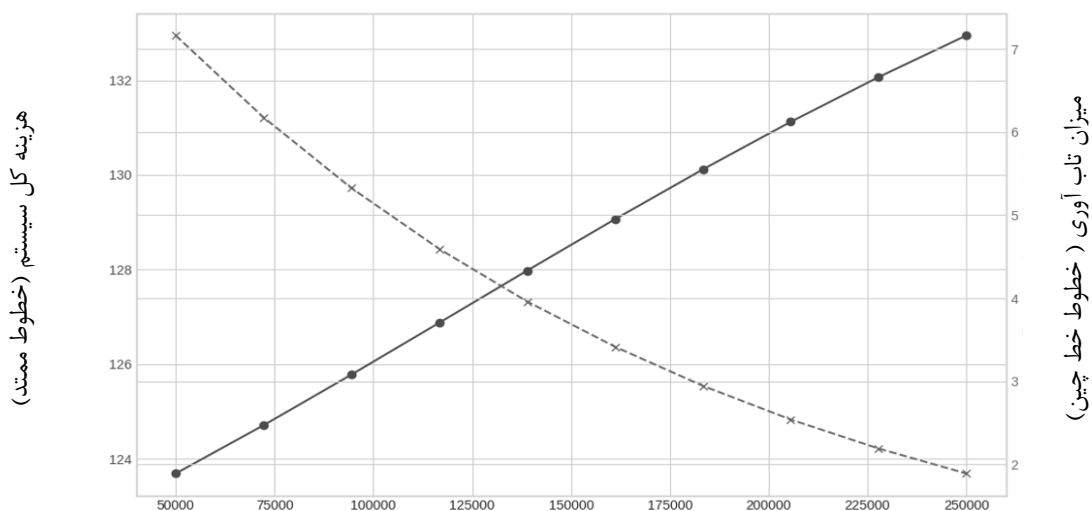
- کل هزینه مورد انتظار سالانه: معادل ۱۲/۵ میلیون واحد پولی (شامل هزینه سرمایه گذاری، قراردادها و هزینه های عملیاتی).
- مجموع انتشارات گازهای گلخانه ای: معادل ۴۸۰۰ تن CO₂ معادل در سال.

تحلیل مقایسه ای نشان داد که اگر مدل از استراتژی تاب آوری (عقد قرارداد با پشتیبان) استفاده نمی کرد، هزینه مورد انتظار به دلیل ریسک اخلاص و جریمه های ناشی از آن به ۱۴/۲ میلیون واحد پولی افزایش می یافت. این مقایسه عددی، توجیه اقتصادی سرمایه گذاری در تاب آوری را به وضوح نشان می دهد.

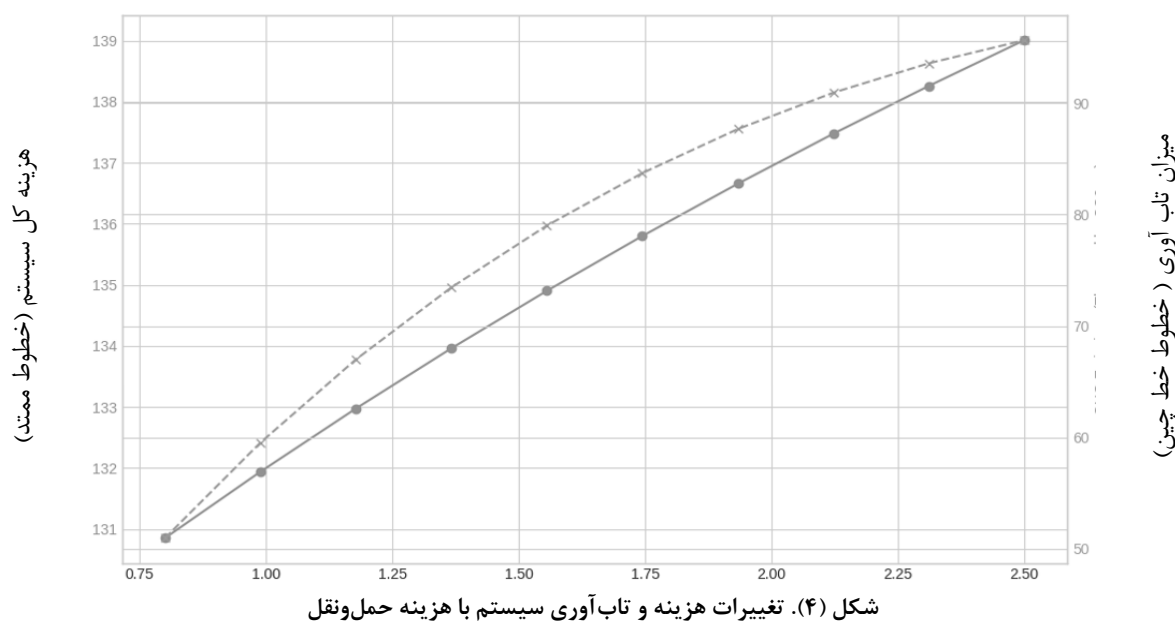
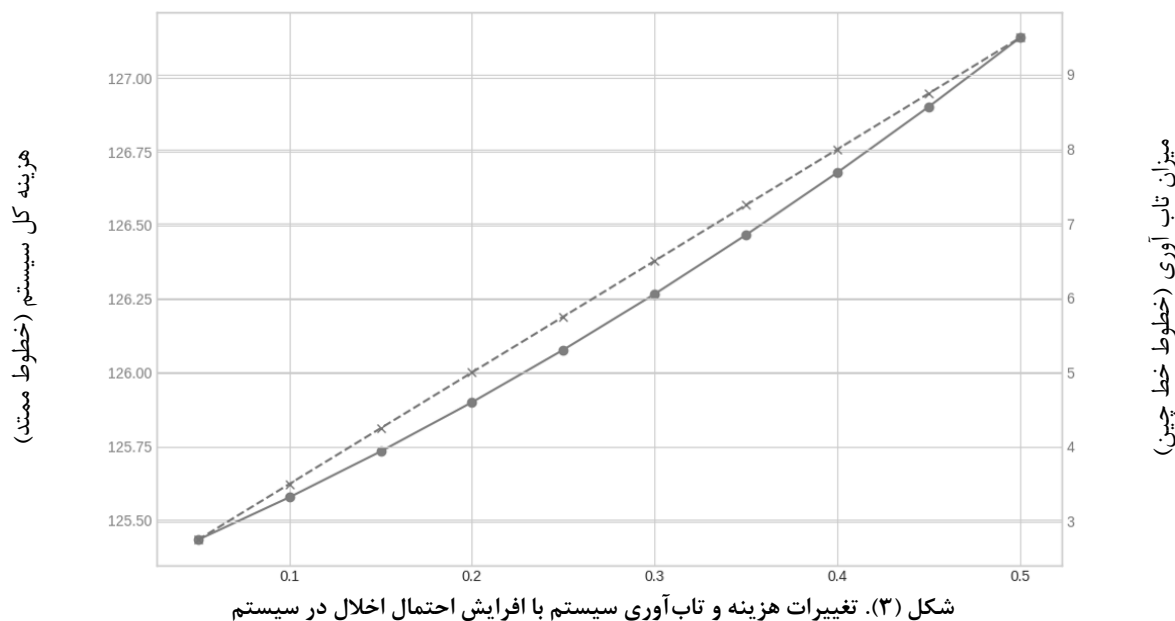
۵-۲. تحلیل حساسیت

به منظور ارزیابی اعتبار و سنجش استوار نتایج به دست آمده از مدل پیشنهادی، در این بخش یک تحلیل حساسیت جامع بر روی پارامترهای کلیدی و تاثیرگذار مسأله انجام می شود. از آنجایی که مقادیر پارامترها در دنیای واقعی با عدم قطعیت و نوسان همراه هستند؛ تحلیل حساسیت، این امکان را فراهم می آورد تا میزان تاثیرپذیری توابع هدف و متغیرهای تصمیم استراتژیک از این تغییرات، مورد مطالعه قرار گیرد. این تحلیل به طور خاص بر روی سه پارامتر مهم متمرکز است:

(۱) هزینه عقد قرارداد با تأمین کنندگان پشتیبان به عنوان شاخصی



شکل (۲). تغییرات هزینه و تاب آوری سیستم با افزایش نرخ عقد قرارداد با تأمین کننده پشتیبان



پارامترهای کلیدی به‌طور مستقیم بر ساختار بهینه شبکه و اولویت‌های سرمایه‌گذاری در تاب‌آوری اثر می‌گذارد. به‌عنوان مثال، افزایش هزینه عقد قرارداد با تأمین‌کنندگان پشتیبان گرچه موجب کاهش گرایش مدل به استفاده از منابع جایگزین می‌شود، اما این تصمیم می‌تواند ریسک توقف تولید در سناریوهای اخلاخل را افزایش دهد که هزینه‌های غیرمستقیم بیشتری به‌دنبال خواهد داشت. به همین ترتیب، بالا رفتن احتمال وقوع اخلاخل به شکل واضحی نیاز به ایجاد ظرفیت‌های اضافی و افزایش تعداد تأمین‌کنندگان پشتیبان را اجتناب‌ناپذیر می‌سازد حتی اگر این اقدام باعث رشد هزینه‌های کوتاه مدت شود. چراکه تداوم عملیات و جلوگیری از زیان‌های بزرگ‌تر اولویت دارد. در مورد هزینه حمل‌ونقل نیز مشاهده می‌شود که تغییر این پارامتر علاوه بر اثر مالی مستقیم، ساختار مکانی شبکه را به‌گونه‌ای تغییر می‌دهد که می‌تواند منجر به کاهش مسافت‌های حمل و در نتیجه کنترل انتشار آلاینده‌ها

نمودار شکل (۴) تأثیر افزایش هزینه حمل‌ونقل (محور افقی) را بر اهداف اقتصادی و زیست‌محیطی بررسی می‌کند:

- هزینه کل (خطوط ممتد): با افزایش ضریب هزینه حمل‌ونقل، هزینه کل سیستم نیز بیشتر می‌شود. البته شیب این افزایش خطی نیست، زیرا مدل با تغییر ساختار شبکه (مثلاً احداث تأسیسات بیشتر برای کاهش مسافت) خود را تطبیق می‌دهد.
 - انتشار گازهای گلخانه‌ای (خطوط خط چین): این نمودار نشان می‌دهد که با گران‌تر شدن حمل‌ونقل، مدل به سمت راه‌حلهایی می‌رود که انتشار آلاینده‌گی کمتری دارند، چراکه این آلاینده‌گی ارتباط مستقیمی با مسافت و میزان حمل‌ونقل دارد. در نتیجه، مدل با بهینه‌سازی مسیرها و مکان‌ها، اثر افزایش هزینه را بر روی آلاینده‌گی کنترل می‌کند.
- نتایج تحلیل حساسیت نشان می‌دهد که تغییر هر یک از

مشخص شد که با افزایش احتمال وقوع اخلال، سرمایه‌گذاری بیشتر در راهکارهای تاب‌آوری نه یک انتخاب، بلکه یک ضرورت استراتژیک برای حفظ پایداری عملیات و کنترل هزینه‌ها است. همچنین، تحلیل هزینه‌های حمل‌ونقل نشان داد که این پارامتر نه تنها بر ساختار شبکه و هزینه‌های کل تأثیرگذار است، بلکه می‌تواند به‌عنوان یک اهرم برای کاهش غیرمستقیم اثرات زیست‌محیطی نیز عمل کند.

در نهایت، این پژوهش نشان داد که نادیده گرفتن عدم قطعیت و ریسک اخلال در طراحی زنجیره‌های تأمین، به‌ویژه در صنایع نوپا و وابسته به منابع طبیعی، می‌تواند منجر به طراحی‌های شکننده و غیربهینه شود. مدل ارائه شده یک ابزار پشتیبان تصمیم‌گیری قدرتمند برای مدیران و سیاست‌گذاران است که به آن‌ها اجازه می‌دهد تا با دیدی جامع، ساختار زنجیره تأمین خود را به‌گونه‌ای طراحی کنند که نه تنها از نظر اقتصادی کارآمد و از نظر زیست‌محیطی مسئولانه باشد، بلکه توانایی مقاومت و سازگاری در برابر چالش‌های پیش‌بینی نشده دنیای واقعی را نیز داشته باشد. مسیرهای ارائه شده در ادامه می‌تواند این چارچوب را برای دستیابی به مدل‌های واقع‌گرایانه‌تر و جامع‌تر در آینده، هرچه بیشتر توسعه دهد.

در مجموع، نتایج این پژوهش نوآوری خود را در سه محور اصلی نشان داد: (۱) توسعه مدلی که برای اولین بار عدم قطعیت اخلال تأمین‌کنندگان را در صنعت مواد شیمیایی سبز با رویکرد تصادفی دومرحله‌ای ترکیب کرده است؛ (۲) کشف اینکه تاب‌آوری در این صنعت، یک هزینه صرف نیست، بلکه یک سرمایه‌گذاری است که نقطه بهینه اقتصادی مشخصی دارد و فراتر از آن به نفع سیستم خواهد بود؛ و (۳) اثبات اینکه استراتژی‌های واکنشی (مانند استفاده از تأمین‌کننده پشتیبان) باید در مرحله طراحی شبکه (تصمیمات استراتژیک) پیش‌بینی شوند، زیرا تأثیر مستقیمی بر مکان‌یابی بهینه تأسیسات دارند. این یافته‌ها، دانش فعلی را از سطح «توصیف منطقی» به سطح «تجویز دقیق و کمی» ارتقا داده‌اند.

مدل ارائه شده در این پژوهش اگر چه یک چارچوب جامع برای طراحی یک زنجیره تأمین پایدار و تاب‌آور فراهم می‌آورد؛ با این حال، زمینه‌های متعددی برای توسعه و تعمیق این تحقیق در آینده وجود دارد که می‌تواند به افزایش دقت و کارایی مدل در شرایط واقعی کمک شایانی نماید. این پیشنهادها را می‌توان در سه حوزه اصلی دسته‌بندی کرد: توسعه مدل تاب‌آوری، افزایش واقع‌گرایی مدل و بهره‌گیری از روش‌های حل پیشرفته.

مدل فعلی از یک رویکرد واکنشی در برابر اخلال استفاده می‌کند؛ به این معنا که استراتژی‌های عملیاتی پس از وقوع یک سناریوی اخلال فعال می‌شوند. تحقیق‌های آتی می‌تواند با تمرکز بر راهکارهای پیشگیرانه و هوشمند، مدل تاب‌آوری را به سطح بالاتری ارتقا دهد.

در نظر گرفتن سطوح هشدار برای تأمین‌کنندگان از دیگر مواردی است که تحقیقات آتی می‌تواند دنبال شود. یکی از جذاب‌ترین مسیرها برای توسعه مدل، فاصله گرفتن از فرض باینری (صفر و یک) برای اخلال و تعریف سطوح مختلف هشدار برای تأمین‌کنندگان است. در

گردد. این یافته‌ها اهمیت توجه همزمان به روابط اقتصادی و زیست‌محیطی و ارزیابی دقیق توازن میان هزینه‌های پیشگیرانه و هزینه‌های ناشی از اختلال را در تصمیم‌گیری‌های استراتژیک برجسته می‌کنند.

یافته‌های حاصل از تحلیل حساسیت، فراتر از تأیید عملکرد صحیح مدل، به کشف روابط پنهان و نوآورانه‌ای منجر شد که در ادبیات موضوع کمتر به آن‌ها پرداخته شده است. اولین نوآوری نتایج، شناسایی «اثر آستانه‌ای در سرمایه‌گذاری تاب‌آوری» است. همان‌طور که در شکل (۲) مشاهده شد، افزایش هزینه تأمین‌کنندگان پشتیبان همواره منجر به کاهش تاب‌آوری نمی‌شود؛ بلکه مدل یک نقطه شکست را شناسایی می‌کند که در آن، سیستم ترجیح می‌دهد ریسک اخلال را بپذیرد. این کشف نشان می‌دهد که در زنجیره‌های تأمین مواد شیمیایی، استراتژی‌های تاب‌آوری باید براساس تحلیل هزینه-مزیت دقیق تنظیم شوند و نه صرفاً براساس اصول کلی.

دومین نوآوری حاصل از نتایج، «تعامل استراتژیک بین ریسک تأمین و مکان‌یابی» است. نتایج نشان داد که با افزایش احتمال اخلال (شکل (۳))، مدل صرفاً به سراغ تأمین‌کنندگان پشتیبان نمی‌رود، بلکه ساختار مکانی شبکه را تغییر می‌دهد و تمایل به احداث تأسیسات با ظرفیت‌های بالاتر (اما تعداد کمتر) پیدا می‌کند تا وابستگی به تأمین‌کنندگان پرخطر را کاهش دهد. این بینش نشان می‌دهد که تصمیمات طراحی شبکه (مکان‌یابی) و مدیریت ریسک (تأمین‌کننده پشتیبان) جدا از هم نیستند و باید به‌صورت یکپارچه مدل‌سازی شوند که این امر، نوآوری اصلی پژوهش حاضر در مقایسه با مطالعات جداگانه قبلی است.

۶. نتیجه گیری

این پژوهش با هدف پاسخ‌گویی به چالش دوگانه پایداری و تاب‌آوری در زنجیره‌های تأمین مدرن، یک چارچوب جامع برای طراحی شبکه تولید مواد شیمیایی سبز از منابع زیست‌توده ارائه می‌دهد. با تمرکز بر فناوری نوظهور الکتروشیمی سبز، این تحقیق شکاف موجود در ادبیات را با توسعه یک مدل تصادفی دومرحله‌ای پر می‌کند که به‌طور همزمان به بهینه‌سازی اهداف اقتصادی (هزینه) و زیست‌محیطی (انتشار گازهای گلخانه‌ای) تحت شرایط عدم قطعیت ناشی از اخلال در تأمین‌کنندگان می‌پردازد. استراتژی کلیدی مدل برای مدیریت ریسک، استفاده هوشمندانه از تأمین‌کنندگان ثانویه (پشتیبان) به منظور افزایش تاب‌آوری شبکه می‌باشد.

یافته‌های اصلی حاصل از اجرای مدل و تحلیل حساسیت، بینش‌های مدیریتی مهمی را آشکار ساخت. نتایج به‌وضوح نشان داد که یک توازن بنیادین میان هزینه سرمایه‌گذاری در تاب‌آوری و ریسک‌های ناشی از اخلال وجود دارد. تحلیل حساسیت بر روی هزینه عقد قرارداد پشتیبان نشان داد که افزایش هزینه تاب‌آوری، مدل را به سمت پذیرش ریسک بیشتر سوق می‌دهد که در نهایت می‌تواند منجر به افزایش هزینه‌های کل مورد انتظار سیستم شود. از سوی دیگر،

با افزایش ابعاد مسأله (تعداد سناریوها، تأمین‌کنندگان و تأسیسات)، حل دقیق مدل‌های بهینه‌سازی تصادفی به روش‌های متداول، بسیار زمان‌بر و حتی غیرممکن می‌شود. برای حل مسائل در مقیاس بزرگ، می‌توان از الگوریتم‌های تجزیه مانند تجزیه بندرز یا تولید ستون استفاده کرد. این الگوریتم‌ها با شکستن مسأله اصلی به زیرمسأله‌های کوچک‌تر و قابل حل، سرعت و کارایی فرآیند حل را به‌طور چشم‌گیری افزایش می‌دهند.

در صورت افزودن اهداف دیگر به مسأله (مانند اهداف اجتماعی یا افزایش سطح خدمت‌رسانی)، استفاده از الگوریتم‌های فراابتکاری چندهدفه برای یافتن یک تصویر جامع و دقیق از جبهه پارتو (Pareto Frontier) و درک بهتر توازن‌ها میان اهداف مختلف، می‌تواند مؤثر باشد.

شایان ذکر است که اگرچه نتایج عددی حاصل از داده‌های شبیه‌سازی شده نشان‌دهنده عملکرد منطقی و سازگار مدل است، اما تعمیم‌پذیری نتایج نیازمند اعتبارسنجی با داده‌های واقعی می‌باشد. یکی از محدودیت‌های اصلی این پژوهش، عدم دسترسی به داده‌های واقعی یک صنعت خاص در زمان انجام تحقیق بود. بنابراین، پیشنهاد می‌شود در تحقیقات آتی، مدل پیشنهادی روی یک مطالعه موردی واقعی در یکی از کارخانه‌های تولید مواد شیمیایی پیشرو یا زیست‌توده پیاده‌سازی شود تا پارامترهای مدل (مانند ضریب بازده و هزینه‌های انرژی) با مقادیر واقعی کالیبره شده و دقت پیش‌بینی‌های مدل به‌طور تجربی سنجیده شود.

با دنبال کردن این مسیرها (تحقیق‌های آتی پیشنهادی)، می‌توان مدل فعلی را به یک ابزار پشتیبان تصمیم‌گیری قدرتمندتر و جامع‌تر برای مدیران زنجیره‌های تأمین در صنایع شیمیایی و فرآیندی تبدیل کرد.

مراجع

- [1] Anjomshoae, Mohammed, F., Banomyong, A., R., & Azadnia, A. H. (2025). A stochastic risk-averse model for designing resilient-sustainable closed-loop supply chain considering emission schemes. *International Journal of Production Research*. <https://doi.org/10.1080/21681015.2025.2472941>
- [2] Jabbarzadeh, A., Fahimnia, B., & Sabouhi, F. (2018). Resilient and sustainable supply chain design: sustainability analysis under disruption risks. *International Journal of Production Research*, <https://doi.org/10.1080/00207543.2018.1463077>
- [3] Bilgen, B., Akbaş, H., & Karaşahin, M. (2026). A risk-averse two-stage stochastic programming for biomass supply chain planning problem. *Computers & Chemical Engineering*, 204, 109401. <https://doi.org/10.1016/j.compchemeng.2025.109401>
- [4] Zhang, Lei, C., Yan, H., X., & Miao, Q. (2024). Green supply chain optimization based on two-stage heuristic algorithm. *Processes*, 12(6), 1127. <https://doi.org/10.3390/pr1206117>

دنیای واقعی، یک تأمین‌کننده به‌ندرت به‌صورت ناگهانی از کار می‌افتد. معمولاً سیگنال‌ها و هشدارهایی مبنی بر کاهش عملکرد یا افزایش ریسک (مانند مشکلات مالی، کاهش کیفیت یا تأخیر در تحویل) از قبل وجود دارد. می‌توان یک سیستم چندسطحی (مثلاً سبز: وضعیت عادی، زرد: هشدار و ریسک متوسط، قرمز: اختلال قطعی) تعریف کرد. در این حالت، مدل می‌تواند استراتژی‌های متفاوتی را برای هر سطح به‌کار گیرد. برای مثال، در وضعیت «زرد»، مدل می‌تواند به‌جای فعال‌سازی تأمین‌کننده پشتیبان که پرهزینه است، از راهکارهای پیشگیرانه مانند ایجاد موجودی احتیاطی یا افزایش موقت ظرفیت تولید در سایر تأسیسات استفاده کند. این رویکرد، مدل را از یک بهینه‌سازی تصادفی دومرحله‌ای به یک مدل بهینه‌سازی تصادفی چندمرحله‌ای تبدیل می‌کند که به واقعیت نزدیک‌تر بوده و انعطاف‌پذیری بسیار بیشتری را برای مدیران فراهم می‌آورد.

تمرکز این پژوهش بر اختلال در ظرفیت تأمین‌کنندگان است. تحقیقات آتی می‌تواند با درنظر گرفتن سایر منابع عدم قطعیت مانند اختلال در مسیرهای حمل‌ونقل (بسته شدن جاده‌ها یا بنادر)، اختلال در فرآیندهای تولیدی (خرابی تجهیزات در تأسیسات) و یا شوک‌های ناگهانی در تقاضا (عدم قطعیت تقاضا)، مدل جامع‌تری از ریسک‌های زنجیره‌تأمین ارائه دهد.

برای کاربردی‌تر کردن مدل در مقیاس صنعتی، می‌توان جنبه‌های دیگری از واقعیت‌های کسب‌وکار را به آن اضافه کرد. مدل فعلی بر هزینه‌های عملیاتی و سرمایه‌گذاری متمرکز است. می‌توان با افزودن شاخص‌های مالی دقیق‌تر مانند ارزش فعلی خالص (NPV)، نرخ بازگشت سرمایه (ROI) و جریان نقدینگی (Cash Flow)، تحلیل اقتصادی عمیق‌تری ارائه داد. علاوه بر این، ادغام تصمیمات مدیریت موجودی (مانند تعیین نقاط سفارش و حجم بهینه موجودی احتیاطی) در تأسیسات، می‌تواند به‌عنوان یک استراتژی تاب‌آوری دیگر عمل کرده و مدل را از سطح استراتژیک به یک مدل یکپارچه استراتژیک- تاکتیکی تبدیل کند.

بسیاری از پارامترها مانند تقاضا، هزینه‌ها و قیمت‌ها در طول زمان ثابت نیستند. توسعه یک مدل چنددوره‌ای (Multi-period) که در آن پارامترها به‌صورت پویا در یک افق برنامه‌ریزی بلند مدت تغییر می‌کنند، می‌تواند به اتخاذ تصمیمات استراتژیک واقع‌بینانه‌تری منجر شود.

همچنین، با توجه به اهمیت انرژی در فرآیندهای الکتروشیمی، درنظر گرفتن عدم قطعیت در پارامترهای انرژی می‌تواند واقع‌گرایی مدل را افزایش دهد. مدل فعلی هزینه برق را ثابت فرض می‌کند، در حالی که در دنیای واقعی قیمت برق و الگوی تقاضای انرژی (مثلاً تفاوت بین ساعات اوج و کم‌بار) نوسان دارد. توسعه مدل‌های چنددوره‌ای یا مدل‌های تصادفی که سناریوهای مختلف قیمتی و مصرفی انرژی را پوشش دهند، می‌تواند برآورد دقیق‌تری از هزینه‌های عملیاتی و ردپای کربن ارائه دهد.

- Sustainable Operations and Computers, 3, 183-204. <https://doi.org/10.1016/j.susoc.2022.01.001>
- [15] Ruiz-Torres, A. J., Mahmoodi, F., & Ohmori, S. (2019). Joint determination of supplier capacity and returner incentives in a closed-loop supply chain. *Journal of Cleaner Production*, 215, 1351-1361. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2019.01.146>
- [16] Mohamadpour Tosarkani, B., & Hassanzadeh Amin, S. (2019). An environmental optimization model to configure a hybrid forward and reverse supply chain network under uncertainty. *Computers & Chemical Engineering*, 125, 305-321. <https://doi.org/10.1016/j.compchemeng.2018.11.014>
- [17] Elizalde Camacho, Á. R., Gholian-Jouybari, F., Mosallanezhad, B., Smith, N. R., & Hajiaghaci-Keshteli, M. (2025). Designing a sustainable and resilient agri-food closed-loop supply chain network for porcine products. *Sustainable Futures*, 9, 100591.
- [۱۸] نخعی نژاد، مهدی، محزون، محمد، سالکی، میلاد (۱۴۰۳). ارائه مدل زنجیره تأمین سبز با در نظر گرفتن هزینه انتشار کربن در بخش های حمل و نقل و نگهداری در وسایل نقلیه ناهمگن. نشریه پژوهش های مهندسی صنایع در سیستم های تولید. ۱۲ (۲۴)، ۹۷-۹۱.
- [۱۹] حمدی اصل، عبدالرضا، عموزادخلیلی، حسین، توکلی مقدم، رضا، حاجی آقایی، مصطفی. (۱۴۰۰). بهینه سازی چندهدفه در طراحی شبکه زنجیره تأمین خرما. نشریه پژوهش های مهندسی صنایع در سیستم های تولید. ۱۱ (۲۲)، ۱۵۳-۱۳۷.
- [۲۰] عبداله زاده، سهراب، عاصم فرزانه، زهرا. (۱۴۰۲). مدل ریاضی برای بهبود عملکرد زنجیره تأمین سبز با استفاده از مفهوم همزیستی صنعتی. نشریه پژوهش های مهندسی صنایع در سیستم های تولید. ۱۱ (۲۲)، ۱۰۹-۹۷.
- [۲۱] قهرمانی نهر، جاوید، قدرت نما، علی، ایزد بخش، حمید رضا، توکلی مقدم، رضا. (۱۳۹۷). طراحی یک شبکه زنجیره تأمین سبز چند هدفه چند محصولی و چند دوره ای با در نظر گرفتن تخفیف در شرایط عدم قطعیت. نشریه پژوهش های مهندسی صنایع در سیستم های تولید. ۶ (۱۳)، ۱۳۷-۱۱۹.
- [22] John R. Birge & François Louveaux (1997). *Introduction to Stochastic Programming*. Springer-Verlag.
- [23] Zeleny, M. (1982). *Multiple Criteria Decision Making*. McGraw-Hill, New York.
- [5] Soltani, T., M., Noori, S., & Dehghani, E. (2025). A two-stage approach to enhancing biofuel supply chains through predictive and optimization analytics. *Sustainable Computing: Informatics and Systems*. Advance online publication. <https://doi.org/10.1016/j.sca.2025.100155>
- [6] Majdfaghihi, M. H. (2023). A multi-objective stochastic programming model for resilient and sustainable supply chains under uncertainty, *Dissertations*.
- [7] Roy, H. N., Almeshdawe, E., & Kabir, G. (2024) A two-stage stochastic optimization framework for retail supply chain modeling with contemporaneous resilient strategies. *Production Engineering*, 18(1). <https://doi.org/10.1007/s11740-024-01279-x>
- [8] Sabouhi, F., Jabalameli, M. S., & Jabbarzadeh, A. (2021). An optimization approach for sustainable and resilient supply chain design with regional considerations. *Computers & Industrial Engineering*, 158, 107510. <https://doi.org/10.1016/j.cie.2021.107510>
- [9] Lu, J., Li, F., & Wu, D. (2024). A two-stage sustainable supplier selection model considering disruption risk. *Sustainability*, 16(9), 3821. <https://doi.org/10.3390/su16093821>
- [10] Dehshiri, Hosseini, S. J., Amiri, M., Olfat, L., & Pishvae, M. S. (2022). Multi-objective closed-loop supply chain network design: A novel robust stochastic, possibilistic, and flexible approach. *Expert Systems with Applications*, 202, 117807. <https://doi.org/10.1016/j.eswa.2022.117807>
- [11] Cheraghalipour, A., & Farsad, S. (2018). A bi-objective sustainable supplier selection and order allocation considering quantity discounts under disruption risks: A case study in plastic industry. *Computers & Industrial Engineering*, 118, 237-250. <https://doi.org/10.1016/j.cie.2018.02.041>
- [12] Mari, S. I., Lee, Y. H., & Memon, M. S. (2014). Sustainable and resilient supply chain network design under disruption risks. *Sustainability*, 6(10), 6666-6686. <https://doi.org/10.3390/su6106666>
- [13] Kumar, A., & Kumar, K. (2024). An uncertain sustainable supply chain network design for regulating greenhouse gas emission and supply chain cost. *Cleaner Logistics and Supply Chain*, 10, 100142. <https://doi.org/10.1016/j.clscn.2024.100142>
- [14] Joshi, S. (2022). A review on sustainable supply chain network design: Dimensions, paradigms, concepts, framework and future directions.

Designing a Sustainable and Resilient Supply Chain for Green Chemical Production under Supplier Disruption Uncertainty: A Two-Stage Stochastic Approach

Mahdi Nakhaeinejad^{*1}, Asma Ranjbar²

1. Department of Industrial Engineering, Faculty of Engineering, Yazd University, Yazd, Iran.

2. Department of Industrial Engineering, Faculty of Engineering, Yazd University, Yazd, Iran.

ARTICLE INFO

Article history:

Received 2025/11/03

Revised 2026/02/23

Accepted 2026/02/26

Keywords:

Sustainable Supply Chain,
Supply Chain Resilience,
Supplier Disruptions.

ABSTRACT

Today, the transition toward sustainable production of chemicals from biomass resources faces multiple challenges, including the vulnerability of supply chains to unforeseen disruptions. This study proposes a two-stage stochastic model aimed at designing a supply chain network that is simultaneously sustainable and resilient. In the model, the risk of disruption in the capacity of primary suppliers is managed by introducing secondary suppliers as a strategic approach to enhance resilience. The proposed model pursues two conflicting objectives: minimizing the total expected system costs and minimizing the total expected greenhouse gas emissions. First-stage decisions involve the location and capacity allocation of facilities as well as contracting with backup suppliers, while second-stage decisions determine operational flows after the occurrence of each disruption scenario. The results demonstrate that this approach provides a powerful framework for strategic decision-making, improving the trade-off between investment in resilience and the risks arising from uncertainty.

* Corresponding author. M. Nakhaeinejad

Tel.: 035-31233819; E-mail address: m.nakhaeinejad@yazd.ac.ir