

ارائه یک مدل بهینه‌سازی چندهدفه به منظور طراحی و برنامه‌ریزی پایدار و تاب‌آور زنجیره تأمین تحت ریسک اختلال تأمین

زهرا صادقی

کارشناسی ارشد، گروه مهندسی صنایع، واحد نجف آباد، دانشگاه آزاد اسلامی، نجف‌آباد، ایران. Zahrasadeghi19769@gmail.com

امید بویرحسینی

استادیار، گروه مهندسی صنایع، واحد نجف آباد، دانشگاه آزاد اسلامی، نجف‌آباد، ایران.

چکیده

امروزه با برنامه‌ریزی زنجیره‌تأمین پایدار با در نظر گرفتن اهداف اقتصادی، اجتماعی و زیست‌محیطی باعث ایجاد مزیت رقابتی و افزایش قدرت زنجیره تأمین شد. با این وجود تأثیرات پیاده‌سازی اصول پایداری در تاب‌آوری یک زنجیره‌تأمین و در مواجهه با اختلالات هنوز به صورت عمیق مورد بررسی پژوهشگران قرار نگرفته است. زنجیره‌تأمین تاب‌آور با بهره‌مندی از سبک تأمین تاب‌آور، می‌تواند میزان ریسک و آسیب‌پذیری زنجیره‌های تأمین را در مواجهه با اختلالات کاهش دهد. در این تحقیق به مدل‌سازی مسئله برنامه‌ریزی پایدار و تاب‌آور یک شبکه زنجیره‌تأمین چهارسطحی پرداخته می‌شود. بدین منظور یک مدل ریاضی چندهدفه توسعه داده می‌شود که در کنار هدف اقتصادی، برای پایداری زنجیره‌تأمین به بیشینه‌سازی نمرات اجتماعی و زیست‌محیطی تأمین‌کنندگان و همچنین کمینه‌سازی تأخیر در تحویل محصولات پرداخته می‌شود، و از دو روش اسپیلون محدودیت تکامل‌یافته و L_p متریک برای موازنه اهداف استفاده می‌شود. نهایتاً، با استفاده از مثال عددی و تحلیل حساسیت کارایی مدل اثبات می‌شود.

کلمات کلیدی: برنامه‌ریزی زنجیره‌تأمین، پایداری، تاب‌آوری، اختلال تأمین، بهینه‌سازی چندهدفه، L_p متریک، اسپیلون محدودیت تکامل‌یافته

۱- مقدمه

طراحی شبکه زنجیره‌تأمین (SCND) سه سطح از تصمیمات را شامل می‌شود: تصمیمات استراتژیک، فنی و عملیاتی. در این مرحله، تصمیمات مختلفی از انواع استراتژیک آن (در ارتباط با مشخصه‌های تسهیلات مانند سایز، نوع و مکان) تا بسیاری از تصمیمات فنی در ارتباط با جابه‌جایی و انبارداری اتخاذ می‌گردد که شاید مهم‌ترین آن‌ها مکان‌یابی تسهیلات در رده‌های مختلف زنجیره باشد. طراحی مناسب و بهینه ساختار شبکه زنجیره‌تأمین که عملکرد آتی آن را کاملاً تحت تأثیر قرار می‌دهد، تأثیر بسزایی بر کارایی زنجیره و افزایش قدرت رقابت-پذیری آن خواهد داشت [۲].

تاب‌آوری به عنوان مشخصه‌ای تعریف می‌شود که این امکان را برای زنجیره‌های تأمین فراهم می‌آورد تا پس از وقوع

امروزه رقابت شدید در بازارهای جهانی، رشد انتظارات مشتریان و بهبود و ارتقا سریع در تکنولوژی ارتباطی و اطلاعاتی باعث تغییرات فراوانی در حوزه کسب و کار شده است که از آن جمله می‌توان به کوتاه‌تر شدن چرخه عمر محصول، تنوع محصول، رفتار پویاتر مشتریان در ارتباط با انتخاب‌ها و تقاضاهایشان و تغییر وضعیت حمل و نقل اشاره نمود. حفظ بقا در فضای رقابت کسب و کار امروزی شرکت‌های تجاری را به سرمایه‌گذاری و توسعه تکنیک‌های مدیریتی به شیوه‌ای کارا ترغیب می‌نماید [۱]. در این زمینه طراحی شبکه زنجیره‌تأمین از مهم‌ترین عوامل موثر در حفظ کارایی و اثربخشی یک شرکت می‌باشد.

تعریف و تحقق اهداف سازمانی در راستای اهداف توسعه پایدار می‌بایست، تعادلی را در سه جنبه اصلی اقتصادی، اجتماعی و زیست محیطی به منظور کسب ارزش پایدار ایجاد نماید. اقدامات منبع‌یابی پایدار نیاز به خرید از منابع خارجی را به منظور دسترسی به تأمین‌کنندگان پایدارتر پیشنهاد می‌کنند، با این حال همکاری با شماری از تأمین‌کنندگان که به صورت پراکنده و در فواصل دور از هم فعالیت می‌کنند اولاً ممکن است با ناتوانی شرکت مرکزی در هماهنگ‌سازی و مدیریت تأمین‌کنندگان همراه باشد و ثانیاً این امر، بیش از هر چیز بر اهمیت مسئله مهم انتخاب تأمین‌کنندگان به منظور اطمینان از تاب‌آوری آنان در مواجهه با بحران‌های احتمالی زنجیره‌های تأمین، تأکید دارد.

از جمله نوآوری‌های این تحقیق می‌توان به ارائه یک مدل بهینه‌سازی چندهدفه اشاره کرد که در آن به طور همزمان تاب‌آوری و پایداری زنجیره تأمین مورد توجه قرار می‌گیرد. در نظر گرفتن اختلال تأمین و منبع‌یابی چندگانه در مدلسازی اختلال و تاب‌آوری مدل چندهدفه پیشنهادی مورد توجه قرار می‌گیرد. بکارگیری روش‌های اپسیلون محدودیت تکامل یافته و همچنین روش LP متریک برای موازنه اهداف اقتصادی، پایداری و تاب‌آوری و نهایتاً ارائه یک بینش مدیریتی، که در آن میزان توجه به اختلال و تاب‌آوری زنجیره تأمین تحلیل می‌شود، بر جذابیت این تحقیق افزوده است.

در ادامه این مقاله به مرور پژوهش‌های مرتبط، مدل‌سازی و حل مسأله پرداخته می‌شود. سپس نتایج تحلیل خواهند شد و در پایان پیشنهادهایی برای تحقیقات آینده ارائه می‌گردد.

۲- پیشینه تحقیق

علم پایداری و تئوری تاب‌آوری در زنجیره تأمین، در طی تحقیقات مختلف، غالباً بصورت مستقل مورد مطالعه قرار گرفته‌اند [۹]. در ادامه به برخی از جدیدترین پژوهش‌هایی که مفاهیم تاب‌آوری و یا پایداری را در برنامه‌ریزی زنجیره تأمین مورد توجه قرار داده‌اند، مرور می‌شوند.

بابازاده و همکاران [۱۰] به طراحی یک شبکه زنجیره تأمین بازتولید بیودیزل پرداخته‌اند. در این مدل پیشنهادی، کمینه‌سازی هزینه کل زنجیره تأمین بیودیزل و کمینه‌سازی تأثیرات زیست محیطی ناشی از آن، در شرایط عدم قطعیت در قالب یک مدل برنامه‌ریزی احتمالی چند هدفه مدل‌سازی شده است. در مسئله ارائه شده در این مقاله، تصمیمات استراتژیکی و عملیاتی مانند تصمیمات مکان‌یابی، تخصیص، ظرفیت تسهیلات استقرار یافته، گردش موجودی و ... تحت مفروضات واقعی تعیین می‌گردد. ورسی و پولیاکوسکی [۱۱]، مدل‌سازی و طراحی یک شبکه زنجیره تأمین پایدار را با در نظرگیری ملاحظات و ابعاد

اختلال، بتوانند مزیت‌های رقابتی خود را حفظ کنند [۳]. شرایط از هم گسیختگی در زنجیره‌های تأمین، هنگامی مشاهده می‌شود که سازمان‌ها، با اختلالات ناشی از رویدادهای پیش‌بینی نشده و ناگهانی مواجه می‌گردند: مانند بحران‌های مالی یا فجایای زیست محیطی و غیره. هدف از تاب‌آوری زنجیره تأمین عکس-العمل کارا نسبت به تأثیرات منفی‌ای است که زنجیره‌های تأمین را مختل می‌سازند [۴]. در مرحله بعد و پس از وقوع اختلال، اگر پاسخ مناسبی وجود نداشته باشد، پیامد غایی این رویدادهای منفی، شکستی خواهد بود در تعهدات شرکت که ممکن است در تحویل محصولات/ خدمت و یا دیگر شرایط زمانی تعریف شده، قیمت، برند و موقعیت سازمانی اثرات غیرقابل جبرانی را تحمیل گرداند. گرچه، نتیجه غایی همه اختلالات و پیامدهای آن (به عنوان مثال اختلال تأمین، نوسانات تقاضا و یا اتلاف ظرفیت و غیره) به "سفارشات انجام نشده" ختم می‌گردد. شفی و همکاران مدهای شکست را از نقطه نظر یک سازمان واحد این گونه شناسایی کرده است: اختلال در تأمین، اختلال در حمل و نقل، اختلال در تسهیلات، انسداد در بخش حمل و نقل، اختلال در ارتباطات و اختلال در تقاضا [۵].

ارزیابی و انتخاب تأمین‌کنندگان تصمیم مهمی در فرآیند مدیریت موثر زنجیره تأمین به شمار می‌آید. انتخاب تأمین‌کنندگان یک مسئله تصمیم‌گیری چند معیاره است که ملاحظات در مشخصات کمی و کیفی را در برمی‌گیرد. انتخاب تأمین‌کنندگان با دادن اولویت‌های بیشتر به ریسک‌های مرتبط با مسائلی که آسیب‌پذیری زنجیره‌های تأمین را تا حد زیادی کاهش می‌دهد، انجام می‌گیرد [۶]. مسئله مدیریت و رویایی با ریسک‌های گوناگون و تقسیم آن‌ها در سراسر زنجیره تأمین می‌تواند نقش مهمی را در بهبود عملکرد زنجیره‌های تأمین ایفا نماید [۷].

طی سال‌های اخیر و با وجود افزایش توجهات نسبت به پیامدهای اجتماعی و زیست محیطی فعالیت‌های کسب و کار و همچنین شیوع گسترده چالش‌های مرتبط با پایداری، برنامه‌ریزی و طراحی شبکه‌های زنجیره تأمین، توسعه یافته و باعث شده تا صورت جدیدی از زنجیره‌های تأمین مانند زنجیره‌های تأمین سبز و یا پایدار امروزه مورد توجه بیشتر پژوهشگران قرار گیرد و این رویکرد جدید، لزوم در نظرگیری ابعاد چندگانه پایداری را به هنگام طراحی شبکه‌های زنجیره تأمین آشکار می‌نماید. چالش‌های پایداری می‌تواند با ایجاد تعادل در ابعاد اقتصادی، اجتماعی و زیست محیطی رشد، توسعه و عملکرد سازمان‌ها تعدیل گردد. این رویکرد اول بار در سال ۱۹۹۸ و با هدف تشویق صاحبان کسب و کار به ارزیابی عملکردشان بر اساس تأثیرات زیست محیطی و اجتماعی در کنار هدف مرسوم "افزایش سودآوری" توسط الکینگتون معرفی شده است [۸].

عدم قطعیت توسعه داده‌اند. در این مقاله، نویسندگان به منظور رویارویی با شرایط عدم قطعیت، رویکرد برنامه‌ریزی تصادفی-احتمالی فازی جدید را توسعه داده‌اند. در این تحقیق معیارهای جدیدی از تاب‌آوری و پایداری معرفی و مورد استفاده قرار گرفته است: کمیته‌سازی هزینه کل، بهینه‌سازی رضایت اجتماعی، کمیته‌سازی معیارهای تاب‌آوری از پیش تعیین شده زیست-محیطی، ۴ تابع هدف تعریف شده در مسئله مورد بررسی در این تحقیق می‌باشند. ایوانف [۱۸] اشتراکات بین ابعاد پایداری و زیست‌محیطی را در زنجیره‌های تأمین مورد ارزیابی قرار داده است. تمرکز اصلی این مطالعه که بر مبنای شبیه‌سازی شکل گرفته است بر تشخیص این نکته است که کدام عامل از عوامل پایداری می‌تواند باعث ایجاد و یا کاهش تأثیر موجی در زنجیره‌های تأمین شود. هدف از انجام این مقاله را می‌توان "تحلیل انتشار اختلال در یک زنجیره‌تأمین با در نظرگیری ابعاد پایداری (اقتصادی، اجتماعی و زیست‌محیطی) به منظور طراحی ساختار زنجیره‌تأمینی تاب‌آور و با ملاحظه کاهش اثر موجی و افزایش پایداری در زنجیره‌تأمین" معرفی کرد. جبارزاده و همکاران [۱۹]، یک رویکرد ترکیبی را به منظور طراحی شبکه زنجیره‌تأمین پایدار ارائه داده‌اند که می‌تواند در مواجهه با اختلالات تصادفی با عملکردی تاب‌آور پایدار باقی بماند.

با مرور ادبیات و بررسی مقالات انتشار یافته در حوزه مدیریت زنجیره‌تأمین ملاحظه می‌شود که اخیراً بحث‌های پایداری در زنجیره‌تأمین و تاب‌آوری زنجیره‌تأمین بسیار مورد توجه محققین قرار گرفته است. در برخی از تحقیقات فقط پایداری زنجیره‌تأمین مورد توجه بوده است و در برخی دیگر فقط به تاب‌آوری آن پرداخته شده است. در تعداد محدودی نیز همزمان پایداری و تاب‌آوری در زنجیره‌تأمین مورد توجه قرار گرفته است اما استراتژی‌های آنها قابل توسعه و بهبود است. از جمله مهم‌ترین نوآوری‌های این تحقیق نسبت به مقالات انتشار یافته و پژوهش‌های صورت گرفته می‌توان به موارد زیر اشاره کرد:

- در نظر گرفتن سبد تأمین تاب‌آور در کنار طراحی شبکه زنجیره‌تأمین پایدار با اهداف اقتصادی، اجتماعی و زیست‌محیطی
- ارائه یک مدل بهینه‌سازی چندهدفه همراه با دو رویکرد حل چندهدفه برای موازنه اهداف اقتصادی، پایداری و تاب‌آوری
- در نظر گرفتن هدف مشتری‌محور کمیته‌سازی تأخیر در تحویل
- ارائه یک رویکرد کنترلی مناسب به منظور تعیین نرخ بهینه توجه به اختلال و شرایط معمول تجاری

پایداری مورد بررسی قرار داده‌اند. نویسندگان در این مقاله مدل خود را در ابعاد بزرگ و با استفاده از یک مسئله برنامه‌ریزی چندهدفه آمیخته ارائه داده و برای حل آن از روش اپسیلون محدودیت تکامل یافته تحت سناریوهای مختلف استفاده کرده‌اند.

بارود و همکاران [۱۲] با تکیه بر مدل ارائه شده در تحقیق پنت و همکاران، یک رویکرد تصادفی را برای محاسبه سه شاخص هزینه تاب‌آوری شامل: اتلاف هزینه خدمت، هزینه استقرار مجدد شبکه و هزینه تأثیرات متقابل را معرفی می‌کند.

گوپتا و همکاران [۱۳] از دیدگاه تئوری بازی‌ها، الزامات استراتژی منبع‌یابی بحرانی را تحت رقابت و در حضور اختلالات عرضه ممکن، مورد مطالعه قرار داده‌اند. زمان وقوع اختلال عرضه غیرقطعی و برون‌زا در نظر گرفته شده اما زمان تدارکات ملزومات، در کنترل شرکت فرض شده است. نتایج این تحقیق نشان می‌دهد که اختلال عرضه و زمان‌های تدارکات مشترکاً بر تصمیمات خرید شرکت‌ها، مقادیر بهینه سفارش و سودهای مورد انتظار آن‌ها تأثیر می‌گذارد. در مقاله دیگری با عنوان "مدیریت ریسک زنجیره‌تأمین"، مروری جامع بر ادبیات مدیریت ریسک در زنجیره‌های تأمین صورت گرفته است. در این مقاله ضمن ارائه چارچوبی مفهومی در تعریف مدیریت ریسک زنجیره‌های تأمین، تعداد ۲۴۴ مقاله انتشار یافته در طی سال‌های ۲۰۰۳ تا ۲۰۱۳ از ابعاد گوناگون مدیریت ریسک، مورد ارزیابی و مقایسه قرار گرفته است [۱۴].

رضاپور و همکاران [۱۵]. یک توپولوژی تاب‌آور را برای زنجیره‌تأمینی توسعه داده‌اند که قادر به بازیابی واکنش سریع به اختلالات است. سه سیاست تحلیل شده در این تحقیق: نگهداری و حفظ ذخیره اضطراری در سطح خرده‌فروشی، ذخیره‌سازی ظرفیت پشتیبان در تأمین‌کنندگان و منبع‌یابی چندگانه است. نویسندگان از یک مدل غیرخطی عدد صحیح آمیخته جهت یافتن سودآورترین شبکه و سیاست‌های کاهش ریسک استفاده کرده‌اند.

فهیمنی‌نیا و جبارزاده [۱۶] در مقاله‌ای به بررسی ابعاد پایداری و تاب‌آوری در سطح طراحی یک شبکه زنجیره‌تأمین پرداخته‌اند. در این تحقیق یک مدل بهینه‌سازی چندهدفه ارائه شده است که از رویکرد امتیازدهی عملکرد پایداری، به منظور کمی‌سازی عملکرد اجتماعی و زیست‌محیطی زنجیره‌تأمین استفاده می‌کند. نویسندگان در این مقاله به منظور تعیین جواب‌های موازنه در جهت توسعه یک زنجیره‌تأمین تاب‌آور پایدار، یک رویکرد برنامه‌ریزی آرمانی فازی را ارائه داده‌اند. ظهیری و همکاران [۱۷] یک مدل تخصیص مکان‌یابی چند هدفه را با هدف طراحی یک شبکه زنجیره‌تأمین پایدار تاب‌آور در شرایط

۳- مدل پیشنهادی

هدف از انجام این پژوهش نیز توسعه یک مدل ریاضی طراحی شبکه زنجیره تأمین پایدار تاب آور است که ضمن رعایت اصول سه گانه پایداری (اقتصادی، اجتماعی و زیست محیطی) در طراحی یک ساختار بهینه از شبکه زنجیره تأمین، با بهره‌مندی از مفاهیم تاب‌آوری در انتخاب تأمین‌کنندگان تاب‌آور، شبکه زنجیره تأمین طراحی گردد که در آن، تأمین‌کنندگان نسبت به فاکتورهای شکست احتمالی، توانایی رویارویی با اختلال را داشته باشند.

در این تحقیق، یک زنجیره تأمین در نظر گرفته می‌شود که در آن بر اساس مقدار تقاضای برآورد شده، چند نوع محصول تولید و عرضه می‌شود؛ به این صورت که ابتدا تأمین مواد اولیه تأمین‌کنندگان انجام می‌شود، سپس محصولات متنوع در کارخانه‌های احداث شده ساخته می‌شود و نهایتاً از طریق مراکز توزیع محصولات از کارخانه‌ها به بازار عرضه می‌شود. طراحی بهینه این زنجیره تأمین با در نظر گرفتن پایداری و تاب‌آوری زنجیره تأمین مورد توجه است.

برنامه‌ریزی بهینه در مورد تصمیمات استراتژیک/راهبردی طراحی این شبکه زنجیره تأمین (مکان‌یابی تسهیلات، انتخاب تأمین‌کننده و عقد قرارداد و تخصیص سفارش به آن‌ها، تخصیص مراکز توزیع به مشتریان و کارخانه‌ها به مراکز توزیع و تعیین جریان کلی زنجیره بین تسهیلات) باید به گونه‌ای صورت پذیرد که هدف اقتصادی کمینه‌سازی هزینه کل زنجیره تأمین تحقق یابد. علاوه بر این هدف، با توجه به: ۱- نمره متفاوت تأمین‌کنندگان در عملکرد زیست محیطی و عملکرد اجتماعی، و ۲- تفاوت درصد تحویل با تأخیر تأمین‌کنندگان، سه هدف اجتماعی، زیست محیطی و مشتری‌مداری (تحویل به موقع) نیز مورد توجه قرار می‌گیرد.

در این تحقیق به مدل‌سازی و حل مسئله برنامه‌ریزی پایدار و تاب‌آور یک شبکه زنجیره تأمین چهارسطحی پرداخته می‌شود. محل، ظرفیت و هزینه تأمین‌کنندگان مشخص است ولی تأمین‌کنندگان با احتمالاتی معین تحت شکست/اختلال قرار گیرند. در این زنجیره تأمین، باید محل احداث کارخانه‌ها و مراکز توزیع و ظرفیت آنها را تعیین کنند و جریان بهینه مواد و محصولات بین آنها برنامه‌ریزی شود تا تقاضا مراکز فروش با کمترین هزینه و تأخیر به آنها عرضه شود. علاوه بر هدف

اقتصادی، برای پایداری زنجیره تأمین، اهداف اجتماعی و زیست محیطی پیشینه‌سازی نمرات اجتماعی و زیست محیطی تأمین‌کنندگان و همچنین هدف مشتری‌محور کمینه‌سازی تأخیر در تحویل محصولات مورد توجه قرار می‌گیرند.

عمده تصمیمات که در مسئله مورد توجه است، عبارتند از:

- انتخاب تأمین‌کنندگان، عقد قرارداد و تخصیص سفارش مواد اولیه

- عوامل تأثیرگذار عبارتند از: هزینه ثابت انتخاب

و عقد قرارداد با هر تأمین‌کننده، قیمت خرید از

هر تأمین‌کننده، مکان استقرار هر تأمین‌کننده،

ظرفیت هر تأمین‌کننده، امتیاز پایداری، احتمال

شکست و ...

- تعیین مکان و ظرفیت برای احداث کارخانه‌ها و مراکز توزیع (مکان‌یابی تسهیلات و تعیین ظرفیت)

- تعیین جریان بهینه مواد اولیه و محصولات بین تسهیلات مختلف زنجیره تأمین (برنامه‌ریزی جریان محصولات نهایی)

مهم‌ترین مفروضاتی که در مدل‌سازی و حل مسئله در نظر گرفته شده است، عبارتند از:

- مکان استقرار تأمین‌کنندگان مواد اولیه، ظرفیت آن‌ها، هزینه سفارش‌دهی به آن‌ها، هزینه خرید مواد اولیه از هر یک از آن‌ها مشخص است.

- برای هر تأمین‌کننده، نمره عملکرد اجتماعی و زیست محیطی برآورد شده است.

- چند مکان بالقوه برای احداث مراکز تولید در نظر گرفته شده است.

- هر کارخانه می‌تواند یک یا چند محصول را با ظرفیت مختلف تولید کند.

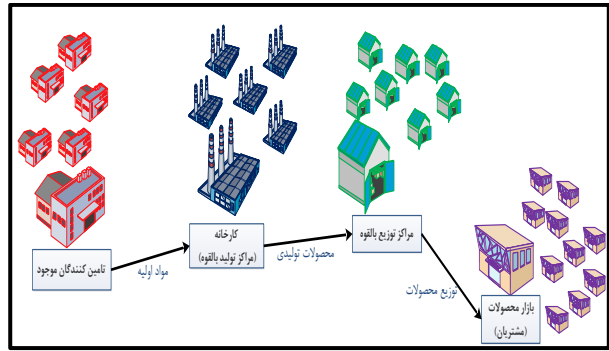
- چند مکان بالقوه برای استقرار مراکز توزیع در نظر گرفته شده است.

- مکان مشتریان (بازارهای مقصد محصولات تولیدی) از پیش مشخص شده است و تقاضای هر بازار برآورد شده است.

- مواد اولیه و محصولات نهایی قابلیت نگهداری و ذخیره‌سازی دارند و زوال آنها ناچیز است.

- یک مدل حمل و نقل در نظر گرفته می‌شود و ظرفیت حمل و نقل محدود است.

t_{rnm} هزینه متغیر خرید ماده خام r از تأمین‌کننده n برای کارخانه m
 g_{im} هزینه متغیر تولید هر واحد از محصول i در کارخانه m
 g_r هزینه هر واحد از فروش از دست رفته ماده خام r زمان فرآیند برای تولید هر واحد از محصول i در کارخانه m
 h_{im} ظرفیت تولید کارخانه با سطح ظرفیت u در منطقه $(h)m$
 c'_{rnm} هزینه انتقال هر واحد از محصول i از کارخانه m به مرکز توزیع w با استفاده از مدل انتقال k
 t'_{imwk} هزینه انتقال هر واحد از محصول i از مرکز توزیع w به منطقه فروش j با استفاده از مدل انتقال k حجم هر واحد از محصول i $(m^3)i$
 h'_i ظرفیت گنجایش مرکز توزیع با سطح ظرفیت v در منطقه w
 c''_{vw} رتبه عملکرد محیطی تأمین‌کننده n برای تولید ماده خام r برای کارخانه m
 e_{rnm} رتبه عملکرد اجتماعی تأمین‌کننده n برای تولید ماده خام r برای کارخانه m
 e'_{rnm} قیمت هر واحد خریداری شده و انتقال داده شده ماده خام r از تأمین‌کننده پشتیبان n برای کارخانه m در هنگام شکست تأمین درصد تخفیف پیشنهادی برای ماده خام r از تأمین‌کننده n برای کارخانه m
 z_{rnm} هزینه قرارداد هر واحد ظرفیت اضطراری پیش-بینی شده ماده خام r از تأمین‌کننده n برای کارخانه m
 d_{rnm} احتمال رخ دادن یک اتفاق منصرف‌فرد که باعث شکست تأمین‌کننده n حداکثر ظرفیت اضطراری برای ماده خام r از تأمین‌کننده n
 p'_n درصد تحویل با تأخیر ماده اولیه r از تأمین‌کننده n برای کارخانه m که موجب تأخیر در تحویل تقاضای مشتریان می‌شود.
 β_{rnm} میزان توجه به شرایط معمول تجاری
 ψ متغیرهای تصمیم
 X_n برابر ۱ اگر تأمین‌کننده n انتخاب شود.
 X'_{um} برابر ۱ اگر کارخانه با سطح ظرفیت u در مکان m استقرار یابد.
 X''_{vw} برابر ۱ اگر مرکز توزیع با سطح ظرفیت v در مکان w استقرار یابد.
 Q_{rnm} مقدار ماده خام r که از تأمین‌کننده n برای کارخانه m انتقال می‌یابد.
 p_{im} مقدار محصول i که در کارخانه m تولید می‌شود



شکل ۱: نمای شماتیک شبکه زنجیره‌تأمین چهارسطحی مورد نظر تحقیق

یک مدل بهینه‌سازی چندهدفه ارائه می‌شود که از حل آن مسئله طراحی شبکه زنجیره‌تأمین پایدار و تاب‌آور به صورت بهینه مشخص می‌شود. در ادامه نخست علائم ریاضی بکارگرفته شده در مدل ریاضی این تحقیق تشریح می‌شوند و سپس اهداف و قیود مدل آورده و به طور کامل توضیح داده خواهند شد.

مجموعه شاخص‌ها

R	مجموعه مواد خام
I	مجموعه نوع/خانواده محصول
N	مجموعه تأمین‌کننده‌ها
M	مجموعه مکان‌های کاندید برای کارخانه‌ها
W	مجموعه مکان‌های کاندید برای مراکز توزیع
J	مجموعه مناطق فروش
U	مجموعه سطوح ظرفیت در کارخانه‌ها
V	مجموعه سطوح ظرفیت در مراکز توزیع
K	مجموعه مدل‌های حمل و نقل محصول
F	مجموعه تأمین‌کنندگانی که در یک زمان تحت سناریو شکست تأمین قرار می‌گیرند.
E	مجموعه همه تأمین‌کنندگان انتخاب شده
$E - F$	مجموعه تأمین‌کنندگانی که تحت سناریو ریسک-های شکست، شکست نمی‌خورند.

پارامترهای ورودی

a_{rnm}	برابر ۱ اگر تأمین‌کننده n در دسترس باشد برای تأمین ماده خام r برای کارخانه m
h_{ri}	مقدار ماده خام r که برای یک واحد از محصول i مورد نیاز است (kg)
c_{rn}	ظرفیت تأمین ماده خام r بوسیله تأمین‌کننده (kgn)
d_{ij}	پیش‌بینی تقاضا برای محصول i در منطقه فروش j
f_n	هزینه ثابت ارزیابی و انتخاب تأمین‌کننده n
f'_{um}	هزینه ثابت تأسیس کارخانه با سطح ظرفیت u در منطقه m
f''_{vw}	هزینه ثابت تأسیس مرکز توزیع با سطح ظرفیت v در منطقه w

هدف اقتصادی مسأله شامل هزینه ارزیابی و انتخاب تأمین‌کننده، هزینه استقرار کارخانه، هزینه استقرار مراکز توزیع، هزینه مواد خام، هزینه تولید، هزینه انتقال از کارخانه به مراکز توزیع، هزینه انتقال از مراکز توزیع به مناطق فروش، هزینه فروش از دست رفته، هزینه قرارداد با تأمین‌کنندگان پشتیبان، هزینه کاهش خرابی می‌باشد. توجه کنید در این رابطه، پارامتر Ψ میزان توجه به شرایط معمول تجاری را نشان می‌دهد، $(1 - \Psi)$ ضریب توجه به شکست احتمالی تأمین‌کنندگان و اختلال در زنجیره تأمین را نشان می‌دهد. این پارامتر در بخش نتایج عددی تحقیق به طور کامل تحلیل می‌شود.

عبارت، احتمال رخ دادن سناریو شکست عرضه که باعث کمبود و اختلال در تأمین مواد اولیه می‌گردد، برای مجموعه F ، که در آن تأمین‌کنندگان به طور همزمان از کار می‌افتند فرموله شده است.

$$\max Z_2 = \sum_{r \in R} \sum_{n \in N} \sum_{m \in M} e_{rnm} (Q_{rnm} + B_{rnm}) \quad (۲)$$

هدف زیست‌محیطی یعنی بیشینه کردن نمره زیست-محیطی تأمین مواد اولیه بیان شده است و مواد اولیه سفارش داده شده سبز می‌باشند. برای محاسبه این نمره رتبه عملکرد زیست‌محیطی هر تأمین‌کننده مواد اولیه با معیارهایی از جمله منابع انرژی جایگزین، مصرف انرژی مانند آب و تولید گازهای گلخانه‌ای در نظر گرفته می‌شود و این رتبه با نظر کارشناس تعیین می‌شود. که تأمین‌کننده را در هنگام انتخاب و سفارش در اولویت بالاتری قرار می‌دهد در نتیجه عملکرد زیست‌محیطی زنجیره بهبود می‌یابد.

$$\max Z_3 = \sum_{r \in R} \sum_{n \in N} \sum_{m \in M} e'_{rnm} (Q_{rnm} + B_{rnm}) \quad (۳)$$

هدف اجتماعی بیشینه کردن نمره اجتماعی تأمین مواد اولیه بیان شده است.

$$\max Z_4 = \sum_{r \in R} \sum_{n \in N} \sum_{m \in M} \beta_{rnm} (Q_{rnm} + B_{rnm}) \quad (۴)$$

مقدار محصول i که از کارخانه m به مرکز توزیع w با مدل انتقال k انتقال می‌یابد.
 مقدار محصول i که از مرکز توزیع w به منطقه فروش j با مدل انتقال k انتقال می‌یابد.
 مقدار ظرفیت اضطراری از ماده خام r که به تأمین‌کننده n برای کارخانه m از باقیمانده ظرفیت اختصاص می‌دهیم.

Y_{imwk}

Y'_{iwjk}

B_{rnm}

توابع هدف

$$\min Z_1 \quad (۱)$$

$$\begin{aligned} &= \Psi \left[\sum_{n \in N} f_n X_n \right. \\ &+ \sum_{u \in U} \sum_{m \in M} f'_{um} X'_{um} \\ &+ \sum_{v \in V} \sum_{w \in W} f''_{vw} X''_{vw} \\ &+ \sum_{r \in R} \sum_{n \in N} \sum_{m \in M} t_{rnm} Q_{rnm} (1 - d_{rnm}) \\ &+ \sum_{i \in I} \sum_{m \in M} g_{im} P_{im} \\ &+ \sum_{i \in I} \sum_{m \in M} \sum_{w \in W} \sum_{k \in K} t'_{imwk} Y_{imwk} \\ &+ \left. \sum_{i \in I} \sum_{w \in W} \sum_{j \in J} \sum_{k \in K} t'_{iiwjk} Y'_{iwjk} \right] \end{aligned}$$

$$+ (1 - \Psi) \left[\sum_{r \in R} g'_r \left(\sum_{i \in I} \sum_{j \in J} d_{ij} h_{ri} \right. \right.$$

$$\left. - \min \left[\sum_{i \in I} \sum_{j \in J} d_{ij} h_{ri}, \sum_{n \in N} \sum_{m \in M} Q_{rnm} + B_{rnm} \right] \right] \prod_{n \in F} p'_n \prod_{n \in (E-F)} (1 - p'_n) + \sum_{r \in R} \sum_{n \in N} \sum_{m \in M} z_{rnm} B_{rnm} +$$

$$\sum_{r \in R} \sum_{n \in N} \sum_{m \in M} z'_{rnm} \left(\min \left[\sum_{r \in R} \sum_{i \in I} \sum_{j \in J} h_{ri} d_{ij} \right. \right.$$

$$\left. - \sum_{r \in R} \sum_{n \in S_n \in E-F} \sum_{m \in M} Q_{rnm}, \sum_{r \in R} \sum_{n \in E-F} \sum_{m \in M} B_{rnm} \right]$$

$$\prod_{n \in F} p'_n \prod_{n \in (E-F)} (1 - p'_n) \left. \right]$$

$$\sum_{m \in M} Q_{rnm} \leq (1 - p'_n) c_{rn} X_n ; \forall r \in R, \forall n \in N \quad (12)$$

محدودیت ظرفیت تأمین‌کنندگان

$$\sum_{i \in I} h'_{im} p_{im} \leq \sum_{u \in U} c'_{um} X'_{um} ; \forall m \in M \quad (13)$$

محدودیت ظرفیت کارخانه‌ها

$$\sum_{i \in I} \sum_{m \in M} \sum_{k \in K} h''_{i} Y_{imwk} \leq \sum_{v \in V} c''_{vw} X''_{vw} ; \forall w \in W \quad (14)$$

محدودیت ظرفیت مراکز توزیع

$$0 \leq B_{rnm} \leq C_{rn} - \sum_{m \in M} Q_{rnm} ; \forall r \in R, n \in N, m \in M \quad (15)$$

محدودیت مقدار ظرفیت اضطراری

$$B_{rnm} \leq B_{rn}^{max} ; \forall r \in R, n \in N, m \in M \quad (16)$$

بیشینه ظرفیت اضطراری برای هر تأمین‌کننده

$$X_n, X'_{um}, X''_{vw} \in \{0, 1\} \quad (17)$$

$$Q_{rnm}, P_{im}, Y_{imwk}, Y'_{iwjk}, B_{rnm} \geq 0 \quad (18)$$

۴- روش Lp متریک برای موازنه اهداف

در حالت کلی، یک مسئله بهینه‌سازی چندهدفه (MODM) به صورت زیر قابل بیان است (البته ممکن است برخی از اهداف بیشینه‌سازی نیز باشند ولی به سادگی قابل تبدیل به صورت زیر هستند):

$$\left\{ \begin{array}{l} \text{Min} (f_1(x), f_2(x), \dots, f_n(x)) \\ x \in X \end{array} \right. \quad (19)$$

در مسائل واقعی MODM، با توجه به تناقض بین اهداف، معمولاً جواب $x^* \in X$ وجود ندارد که به ازای آن همه اهداف در حالت بهینه قرارگیرند ($\nexists x^* \in X : f_i^* = f_i(x^*)$). از این رو، اگر A یک روش حل باشد و جواب x^A به عنوان خروجی آن حاصل شود، آنگاه این روش A زمانی کارایی بیشتری داشته است که $f_i(x^A)$ فاصله کمتری نسبت به f_i^* داشته باشد.

به عبارت دیگر، بر اساس معیار انحراف از ایده آل (MID)، اگر جواب $F^* = (f_1^*, f_2^*, \dots, f_n^*)$ ب به عنوان جواب ایده‌آل در

هدف مشتری‌مداری که بر اساس آن تهیه مواد اولیه با لیدتایم/تأخیر بالا کمینه می‌شود تا به تبع آن تأخیر در تحویل تقاضای مشتریان کمینه گردد.

قیود و محدودیت‌ها

$$\sum_{u \in U} X'_{um} \leq 1 ; \forall m \in M \quad (5)$$

بیش از یک کارخانه در یک مکان کاندید نمی‌تواند احداث کرد.

$$\sum_{v \in V} X''_{vw} \leq 1 ; \forall w \in W \quad (6)$$

بیش از یک مرکز توزیع در یک مکان کاندید نمی‌تواند احداث کرد.

$$Q_{rnm} \leq a'_{rnm} X_n ; \forall r \in R, \forall n \in N, \forall m \in M \quad (7)$$

مواد اولیه را فقط از تأمین‌کننده در دسترس کارخانه می‌توان تأمین نمود.

$$\sum_{n \in N} Q_{rnm} = \sum_{i \in I} h_{ri} p_{im} ; \forall r \in R, \forall m \in M \quad (8)$$

تکمیل مواد خام در کارخانه‌ها را تضمین می‌کند.

$$p_{im} = \sum_{w \in W} \sum_{k \in K} Y_{imwk} ; \forall i \in I, \forall m \in M \quad (9)$$

تعادل جریان محصول در کارخانه‌ها را تضمین می‌کند.

$$\sum_{m \in M} \sum_{k \in K} Y_{imwk} = \sum_{j \in J} \sum_{k \in K} Y'_{iwjk} ; \forall i \in I, \forall w \in W \quad (10)$$

تعادل جریان محصول در مراکز توزیع را تضمین می‌کند.

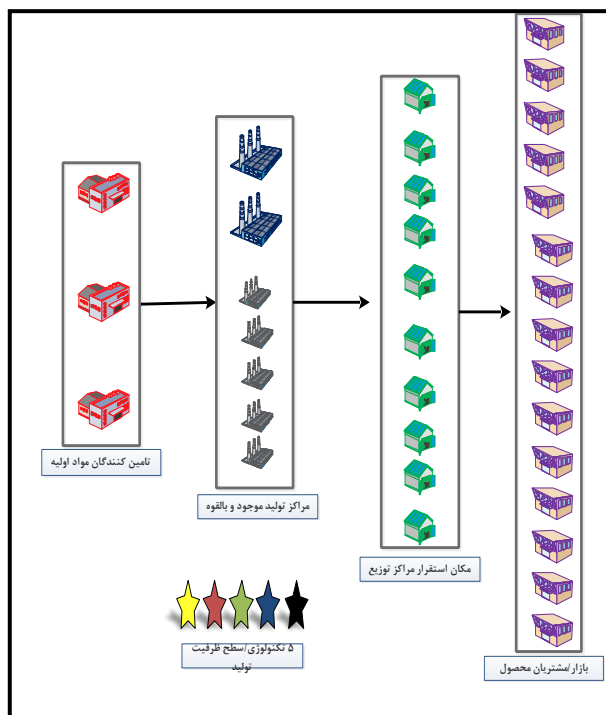
$$\sum_{w \in W} \sum_{k \in K} Y'_{iwjk} + \left(d_{ij} - \min \left[d_{ij}, \sum_{m \in M} p_{im} \right] \right) = d_{ij} ; \forall i \in I, \forall j \in J \quad (11)$$

تعادل جریان محصول در مراکز فروش را تضمین می‌کند. عبارت $\min[d_{ij}, \sum_{m \in M} p_{im}]$ به مقدار فروش از دست رفته اشاره دارد.

که در آن s_i ها متغیرهای نامنفی کمکی و ϕ_i یک پارامتر برای نرمال سازی اهداف هستند. با بدست آوردن ماتریس پی آمد اهداف مسئله با روش لکسیکوگرافیک [۲۱]، چندین مقدار مختلف $e_i \in [\text{Min}(f_i), \text{Max}(f_i)]$ انتخاب می شود و جبهه پارتو بدین طریق بدست می آید.

۶- آزمایشات عددی و تحلیل نتایج

در این بخش نخست یک مطالعه عددی از آورده شده و نتایج محاسباتی بر اساس آن گزارش و تحلیل می شود و از نرم افزار GAMS نسخه 24.7.1، استفاده شده است. به منظور مطالعه عددی مسئله مورد نظر تحقیق، یک شبکه زنجیره تأمین بالقوه و داده های آن در جدول ۱ ملاحظه می شود. فرض شده است این زنجیره تأمین در حال حاضر ۲ کارخانه تولیدی فعال دارد که هر یک از آنها مجهز به تکنولوژی تولید با ظرفیت و استاندارد مشخصی است؛ ۵ مکان بالقوه برای احداث مراکز تولید، ۱۰ مکان بالقوه برای استقرار مراکز توزیع، ۱۵ بازار مشتری موجود است. نهایتاً از طریق ۳ تأمین کننده مواد اولیه تأمین می شود.



شکل ۲: شبکه زنجیره تأمین مطالعه عددی مسئله SCLSC

جدول ۱. داده های مطالعه عددی مسئله

نام	توضیح مقدار ورودی	مقدار
R	مجموعه مواد خام	2
I	مجموعه نوع/خانواده محصول	2
N	مجموعه تأمین کننده ها	3

نظر گرفته شود، آنگاه هرچه جواب $F^A = (f_1(x^A), f_2(x^A), \dots, f_n(x^A))$ از جواب F^* فاصله کمتری داشته باشد، عملکرد روش A و پاسخ آن بهتر است.

اما اینکه فاصله F^A از F^* به چه صورت تعریف شود، اساس تعریف روش Lp متریک است. در واقع، در روش Lp متریک، p به عنوان نرم اندازه گیری فاصله در نظر گرفته می شود و فاصله با نرم p به صورت زیر تعریف می شود:

$$\begin{aligned} Norm_p(F^*, F^A) &= |F^* - F^A|_p \quad (20) \\ &= \left(\sum_{i=1}^n w_i (f_i^* - f_i(x^A))^p \right)^{\frac{1}{p}} \end{aligned}$$

که در آن w_i وزن یا اهمیت نسبی هر هدف را نشان می دهد (که معمولاً توسط تصمیم گیرنده از پیش مشخص می شود). در این تحقیق حل مدل با نرم های $p=1, 2, \infty$ انجام می شود.

۵- روش اپسیلون محدودیت تکامل یافته برای تحلیل

جبهه پارتو

فرض کنید کنید در صورت کلی مسئله MODM براساس مدل (۱۹)، هدف اول به عنوان هدف اصلی در نظر گرفته می شود و سایر اهداف به حد بالای اپسیلون محدود می شوند و در قیود مسئله اعمال می شوند. در این صورت بر اساس روش اپسیلون محدودیت، مدل تک هدفه زیر حاصل می شود:

$$\begin{cases} \text{Min } f_1(x) \\ f_i(x) \leq e_i \quad i = 2, 3, \dots, n \\ x \in X \end{cases} \quad (21)$$

که در آن هدف اول، به عنوان هدف اصلی در نظر گرفته شده است و اهداف دوم تا n ام به مقدار حداکثر e_i محدود می شوند. در روش اپسیلون محدودیت (۲۲)، با تغییر مقادیر e_i جواب های مختلفی به دست می آید که ممکن است کارا نباشند (کارای ضعیف هستند). با اصلاح تکمیل مدل (۲۱)، می توان مشکل مذکور را رفع کرد که به روش اپسیلون محدودیت تکامل یافته (AEC) معروف است [۲۰]. در روش AEC، مدل (۲۱) به صورت زیر بازنویسی می گردد:

$$\begin{cases} \text{Min } f_1(x) - \sum_{i=2}^n \phi_i s_i \\ f_i(x) + s_i = e_i \quad i = 2, 3, \dots, n \\ x \in X \\ s_i \geq 0 \end{cases} \quad (22)$$

U(2-5)	هزینه انتقال هر واحد از محصول i از کارخانه m به مرکز توزیع w با استفاده از مدل انتقال k	t_{imwk}	۵	مجموعه مکان‌های کاندید برای کارخانه‌ها	M
U(3-6)	هزینه انتقال هر واحد از محصول i از مرکز توزیع w به منطقه فروش j با استفاده از مدل انتقال k	t_{iwjk}	۱۰	مجموعه مکان‌های کاندید برای مراکز توزیع	W
1	حجم هر واحد از محصول i (m^3)	h_i	۱۵	مجموعه مناطق فروش	J
1000	ظرفیت گنجایش مرکز توزیع w سطح ظرفیت v در منطقه w	c'_{vw}	۵	مجموعه سطوح ظرفیت در کارخانه‌ها	U
U(0.5-0.9)	رتبه عملکرد محیطی تأمین‌کننده n برای تولید ماده خام r برای کارخانه m	e_{rnm}	2	مجموعه سطوح ظرفیت در مراکز توزیع	V
U(0.5-0.9)	رتبه عملکرد اجتماعی تأمین‌کننده n برای تولید ماده خام r برای کارخانه m	e'_{rnm}	2	مجموعه مدل‌های حمل و نقل محصول	K
U(2-4)	قیمت هر واحد خریداری شده و انتقال داده شده ماده خام r از تأمین‌کننده پشتیبان n برای کارخانه m در هنگام شکست تأمین	z'_{rnm}	3	مجموعه تأمین‌کنندگانی که در یک زمان تحت سناریو شکست تأمین قرار می‌گیرند.	F
U(0.1-0,2)	درصد تخفیف پیشنهادی برای ماده خام r از تأمین‌کننده n برای کارخانه m	d'_{rnm}	3	مجموعه همه تأمین‌کنندگان انتخاب شده	E
U(50-60)	هزینه قرارداد هر واحد ظرفیت اضطراری پیش‌بینی شده ماده خام r از تأمین‌کننده n برای کارخانه m	z_{rnm}	2	مجموعه تأمین‌کنندگانی که تحت سناریو ریسک‌های شکست، شکست نمی‌خورند.	$E - F$
U(0.1-0.4)	احتمال رخ دادن یک اتفاق منحصربفرد که باعث شکست تأمین‌کننده n	p'_n	پارامترهای ورودی		
U(500-600)	حداکثر ظرفیت اضطراری برای ماده خام r از تأمین‌کننده n	B_{rn}^{max}	U(300-500)	ظرفیت تأمین ماده خام r بوسیله تأمین‌کننده n (kg)	c_{rn}
0.05	درصد تحویل با تأخیر ماده اولیه r از تأمین‌کننده n برای کارخانه m که موجب تأخیر در تحویل تقاضای مشتریان می‌شود.	β_{rnm}	U(5-7)	مقدار ماده خام r که برای یک واحد از محصول i مورد نیاز است (kg)	h_{ri}
			U(1-3)	تأمین‌کننده n برابر ۱ اگر تأمین‌کننده n در دسترس باشد برای تأمین ماده خام r برای کارخانه m	S_n
			1		a'_{rnm}
			U(200-300)	پیش‌بینی تقاضا برای محصول i در منطقه فروش j	d_{ij}
			U(900-1000)	هزینه ثابت ارزیابی و انتخاب تأمین‌کننده n	f_n
			U(1000-1200)	هزینه ثابت تأسیس کارخانه با سطح ظرفیت u در منطقه m	f'_{um}
			U(500-700)	هزینه ثابت تأسیس مرکز توزیع با سطح ظرفیت v در منطقه w	f'_{vw}
			U(3-5)	هزینه متغیر خرید ماده خام r از تأمین‌کننده n برای کارخانه m	t_{rnm}
			U(10-12)	هزینه متغیر تولید هر واحد از محصول i در کارخانه m	g_{im}
			U(15-26)	هزینه هر واحد از فروش از دست رفته ماده خام r	g'_r
			U(1-3)	زمان فرآیند برای تولید هر واحد از محصول i در کارخانه m	h_{im}
			1000	ظرفیت تولید کارخانه با سطح ظرفیت u در منطقه m (h)	c'_{rnm}

پاسخ شرایط معمول تجاری (از اینجا به بعد به اختصار BU) بدست آورده می‌شود؛ به این معنا که به هیچ یک از سناریوهای اختلال محتمل توجه نمی‌شود و پاسخ به صورتی است که فقط در شرایط BU بهترین عملکرد ممکن رخ دهد $(0 = 1 - \Psi)$. برای این منظور، هر یک از اهداف مسئله به صورت مجزا در شرایط BU در حالت بهینه قرار گرفته‌اند و مشروط به بهینگی آن، سایر اهداف محاسبه شده‌اند تا ماتریس پی‌آمد بدست آورده شود که در جدول ۲ ملاحظه می‌شود ("هزینه کل (Z1)", "نمره اجتماعی (Z2)", "نمره زیست‌محیطی

اهداف در نظر می‌گیریم. لازم به توضیح است که فرض می‌شود ۷۰٪ شرایط معمول تجاری برقرار است و در ۳۰٪ شرایط اختلال در تأمین مورد توجه است؛ به عبارت دیگر $\psi = 0.7$ در مدل چندهدفه پیشنهادی مسئله قرار داده می‌شود (در بخش آتی به صورت مجزا به تحلیل این ضریب و استخراج بینش مدیریتی پرداخته می‌شود).

(Z3) و "میزان تحویل با تاخیر (Z4)". سپس بر اساس نرم-های مختلف روش Lp متریک، موازنه اهداف انجام می‌شود که در جدول ۳ آمده است. ملاحظه می‌شود در نرم بینهایت، بیشینه انحراف از بهینگی اهداف از سایر حالات کمتر است (البته مجموع انحراف نسبی از بهینگی، با اختلاف ناچیزی بیشتر است). با فرض اینکه چهار هدف پایداری تعریف شده از یک درجه اهمیت برخوردار باشد، پاسخ نرم بینهایت را به عنوان بهترین موازنه بین

جدول ۲ ماتریس پی‌آمد اهداف

payoff	Z1	Z2	Z3	Z4
Z1	15273.55	19503.13	18054.11	16456.13
Z2	534.12	942.45	690.04	642.21
Z3	431.98	611.45	892.55	512.15
Z4	152.05	147.52	104.23	23.11

جدول ۳ موازنه اهداف با نرم‌های مختلف Lp متریک در شرایط BU

نرم	مقدار اهداف				انحراف از بهینگی			
	Z1	Z2	Z3	Z4	d1	d2	d3	d4
$Lp _{=1}$	16423.16	685.53	631.90	43.12	0.08	0.28	0.29	0.87
$Lp _{=2}$	17365.05	685.53	627.13	43.12	0.14	0.28	0.30	0.87
$Lp _{=\infty}$	17701.54	622.13	605.42	39.19	0.16	0.34	0.32	0.74

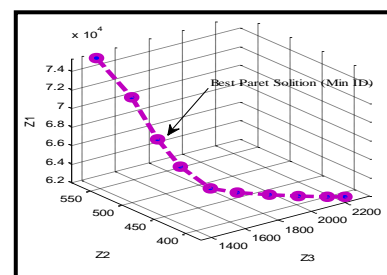
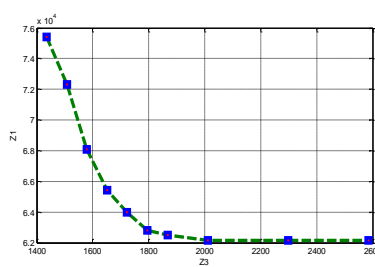
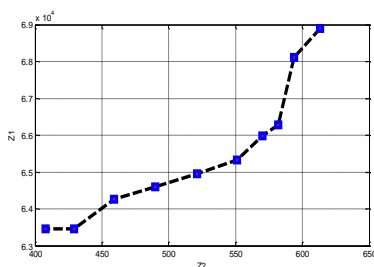
نرمال شده فاصله تا ایده‌آل (ID) با صورت $ID = \frac{|Z_1 - Z_1^*|}{Z_1^*} + \frac{|Z_2 - Z_2^*|}{Z_2^*} + \frac{|Z_3 - Z_3^*|}{Z_3^*}$ تعریف می‌شود. و هر جوابی که ID کمتری داشته باشد، بهتر است.

نمودار جبهه پارتو هدف اقتصادی نسبت به اهداف اجتماعی و زیست محیطی به ترتیب در شکل‌های ۳ و ۴ نشان داده می‌شود. ابتدا مقادیر هدف اجتماعی و زیست محیطی در حالت بهینه خود تنظیم شده‌اند و مقدار هدف اقتصادی محاسبه شده است؛ سپس با انعطاف در اهداف اجتماعی و زیست محیطی، مقدار بهینه هزینه محاسبه شده است. ملاحظه می‌شود که در انعطاف‌های آغازین، بهبود در هزینه بشدت ملموس است ولی از جایی به بعد بهبود خاصی در هزینه رخ نمی‌دهد. این موضوع در جبهه پارتو هدف اقتصادی نسبت به هدف زیست محیطی بیشتر دیده می‌شود.

در ادامه به تحلیل جبهه پارتو اهداف پایداری مبتنی بر روش AEC پرداخته می‌شود و اهداف اقتصادی، اجتماعی و زیست محیطی نسبت به هم تحلیل می‌شود. با در نظر نگرفتن هدف چهارم، در صورتی که هر یک از اهداف اقتصادی، اجتماعی و زیست محیطی به صورت جداگانه مورد توجه قرار گیرد، هر تابع هدف در مقدار بهینه خود قرار می‌گیرد. با توجه به جدول ۲، جواب $Sol_{Ideal} := (Z_1^* = 52350, Z_2^* = 613, Z_3^* = 1436)$ به عنوان یک جواب ایده‌آل تعریف می‌شود که با توجه به تناقض بین اهداف، تحقق این جواب ممکن نیست اما جواب کارایی که کمترین فاصله/انحراف را از این جواب داشته باشید به عنوان بهترین جواب انتخاب می‌شود. همانطور که در جدول ۴ ملاحظه می‌شود، با بکارگیری روش AEC، مجموعه‌ای از جواب-های پارتو بدست آورده شده است که بر اساس معیار فاصله تا جواب ایده‌آل جواب پارتو منتخب مشخص شده است. به منظور انتخاب یک جواب از مجموعه جواب‌های پارتو روش AEC، معیار

جدول ۴. جواب‌های پارتو اهداف پایداری مبتنی بر روش AEC

Z1	Z2	Z3	انحراف از جواب ایده‌آل (ID)
75403	565	1436	0.6186
72356	520	1475	0.4710
68400	493	1525	0.5643
65504	480	1610	0.5894
63056	465	1732	0.6520
62797	445	1820	0.7410
62590	425	1934	0.8490
62484	408	2043	0.9507
62251	395	2164	1.0517
61996	390	2252	1.1162



شکل ۴: نمودار جبهه پارتو هدف اقتصادی (Z1) نسبت به هدف اجتماعی (Z2) و هدف زیست-محیطی (Z3)

شکل ۳: نمودار جبهه پارتو و جواب منتخب

جدول ۵. موازنه بین هدف اقتصادی و اهداف زیست‌محیطی و اجتماعی

موازنه هدف اقتصادی و زیست‌محیطی				موازنه هدف اقتصادی و اجتماعی			
هزینه	Z2	انحراف از Z2 بهینه (%)	بهبود هزینه (%)	هزینه	Z3	انحراف از Z3 بهینه (%)	بهبود هزینه (%)
75403	1436	0	-	68903	613	0	-
72296.4	1507.8	5	4.12	68110.62	594	3	1.15
68066.29	1579.6	10	9.73	66284.69	582	5	3.8
65412.1	1651.4	15	13.25	65988.4	570	7	4.23
64002.07	1723.2	20	15.12	65326.93	551	10	5.19
62810.7	1795	25	16.7	64954.86	521	15	5.73
62509.09	1866.8	30	17.10	64603.45	490	20	6.24
62169.77	2010.4	40	17.55	64265.83	459	25	6.73
62169.77	2297.6	60	17.55	63452.77	429	30	7.91
62169.77	2584.8	80	17.55	63452.77	408	40	7.91

پایداری (اقتصادی، اجتماعی و زیست‌محیطی) به صورت بهینه اعمال گردد.

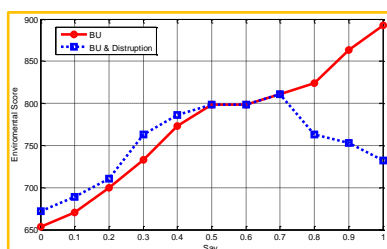
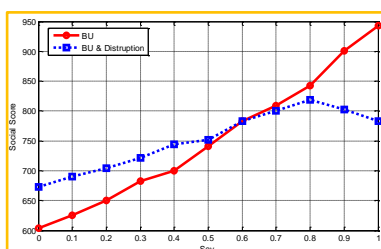
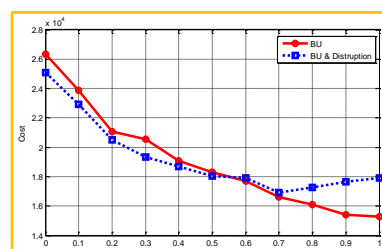
به شکل‌های ۵، ۶ و ۷ توجه کنید که به ترتیب مقادیر اهداف اقتصادی، اجتماعی و زیست‌محیطی را نسبت به تغییرات ضریب ψ نشان می‌دهد. در این تحلیل عددی، با تغییر $0 \leq \psi \leq 1$ مقادیر هدف در دو حالت (حالت-I فقط شرایط تجاری و حالت-II - شرایط تجاری و سناریوهای اختلال محاسبه می‌شود. با مقدار $\psi = 0$ شروع می‌کنیم که کاملاً ریسک‌گریز است و فقط

همانطور که اشاره شد، در اجرای مدل چندهدفه پیشنهادی، ۷۰٪ شرایط معمول تجاری و ۳۰٪ شرایط اختلال در تأمین مورد توجه قرار گرفته است؛ به عبارت دیگر $\psi = 0.7$ و $(1 - \psi) = 0.3$ به ترتیب برای ضریب اهمیت شرایط معمول تجاری و ضریب اهمیت شرایط اختلال تأمین شده است. در این بخش، ضمن تحلیل نحوه تنظیم این ضریب ψ ، این آگاهی برای مدیران زنجیره‌تأمین ایجاد می‌شود که به چه صورت این ضریب تنظیم شود تا تاب‌آوری زنجیره‌تأمین در تحقق هر یک اهداف

دست داده دیگر موجه نیست و توجیه کامل پایداری از بین می‌رود. به عنوان مثال، همانطور که در شکل‌های ۴ و ۶ ملاحظه می‌شود، مقدار اهداف اقتصادی و زیست‌محیطی در حالت II روند بهبود خود را از دست می‌دهد؛ این در حالی است که این افزایش از منظر هدف اجتماعی موجه است. برای توقف افزایش در مقدار ψ دو پیشنهاد ذکر می‌گردد: در پیشنهاد اول، با توجه به اینکه پایداری زنجیره تامین مورد نظر است، منطقی است که به محض آنکه فقط یک هدف پایداری روند بهبود خود را از دست داد، افزایش ψ متوقف شود، و در پیشنهاد دوم، افزایش ψ تا مادامی که حداقل در یک هدف بهبود ایجاد شود، ادامه پیدا کند. در این تحقیق بر مبنای پیشنهاد اول مقدار $\psi=0.7$ برای ضریب اهمیت شرایط معمول تجاری تنظیم شده است، این در صورتی است که مبتنی بر پیشنهاد دوم، $\psi=0.8$ در نظر گرفته می‌شود.

به سناریوهای اختلال محتمل وقوع توجه می‌کند. واضح است در $\psi = 0$ ، چون اصلاً شرایط معمول تجاری مورد توجه قرار نگرفته است، مقدار اهداف پایداری در حالت I در بدترین مقدار قرار دارد. با افزایش ψ ، مطمئناً مقدار اهداف در حالت I بهبود خواهد داشت ولی لزومی ندارد در حالت II نیز بهبود ایجاد شود. در صورت بهبود همه اهداف پایداری در حالت II، مطمئناً افزایش ψ کاملاً توجیه پایداری دارد.

به عنوان مثال، در مطالعه موردی مطرح شده در این تحقیق، افزایش تا $\psi = 0.7$ کاملاً موجه است. با ادامه روند افزایش ψ ، ممکن است یکی از اهداف روند بهبود خود را از دست دهد در حالی که یک یا چند هدف دیگر کماکان در حال بهبود باشد. در این صورت، افزایش ψ از منظر آن هدف که روند بهبود رو از

شکل ۷. تحلیل زیست‌محیطی تاثیر ψ شکل ۶. تحلیل اجتماعی تاثیر ψ شکل ۵. تحلیل اقتصادی تاثیر ψ

منبع‌یابی چندگانه و اخذ قرارداد تامین مواد اولیه با تامین‌کنندگان چندگانه است.

در صورتی که طراحی و برنامه‌ریزی یک زنجیره‌تأمین پایدار بر اساس شرایط معمول تجاری (BU) صورت پذیرد، بی‌شک تصمیمات در شرایط BU بهینه است ولی در صورت بروز اختلال تأمین، پایداری زنجیره‌تأمین بشدت مختل می‌شود و اهداف اقتصادی، اجتماعی و حتی زیست‌محیطی به طور قابل‌ملاحظه‌ای از حالت بهینه انحراف می‌گیرند. این در صورتی است که اگر اصول تاب‌آوری در طراحی و برنامه‌ریزی در نظر گرفته شود و استراتژی‌های مناسب برای بروز اختلال موجود باشد، گرچه ممکن است نسبت به شرایط معمول تجاری کمی هزینه بیشتری بر زنجیره‌تأمین اعمال شود، اما از بسیاری از هزینه‌های احتمالی اختلال پیشگیری می‌شود.

در نظر گرفتن ریسک عملیاتی، اختلال در ظرفیت تسهیلات تولید و توزیع، و مدلسازی زمان بازگشت زنجیره‌تأمین به وضعیت پیش از اختلال و اتخاذ استراتژی‌های تاب‌آوری به منظور بازگشت سریع‌تر، از جمله مواردی هستند که در توسعه این پژوهش می‌تواند مورد توجه قرار گیرد.

۷- نتیجه‌گیری و پیشنهاد تحقیقات آتی

در این پژوهش، مسئله طراحی و برنامه‌ریزی یک زنجیره‌تأمین به منظور مدیریت یک زنجیره‌تأمین پایدار و تاب‌آور در برابر اختلالات تأمین مورد توجه قرار گرفته است. پایداری زنجیره‌تأمین به معنای تحقق همزمان اهداف اقتصادی، زیست‌محیطی و اجتماعی است؛ و تاب‌آوری در طراحی و برنامه‌ریزی موجب می‌شود که پایداری زنجیره‌تأمین در صورت بروز اختلال نیز پابرجا باشد. عمده تصمیمات استراتژیک طراحی و برنامه‌ریزی زنجیره‌تأمین عبارتند از تعیین مکان و اندازه ظرفیت تسهیلات، انتخاب تامین‌کننده و تخصیص سفارش مواد اولیه، و برنامه‌ریزی جریان مواد و محصولات در شبکه. اختلال در زنجیره‌تأمین به این معنا است که یک یا چند سطح از زنجیره نمی‌تواند مطابق با طرح و برنامه بهینه فعلی (شرایط معمول تجاری) فعالیت کند. اختلال تأمین مواد اولیه از جمله مهم‌ترین اختلالات در یک شبکه زنجیره‌تأمین است که بشدت بر عملکرد زنجیره‌تأمین تاثیرگذار است. در این تحقیق، اختلال تأمین مورد توجه قرار گرفته است و استراتژی‌های مختلفی برای تاب‌آوری زنجیره‌تأمین در صورت بروز این اختلال پیشنهاد شده است که از جمله آنها

مراجع:

- approach with real world application," *Computers & Industrial Engineering*, vol. 116, pp. 178-191, 2018.
- [11] M. Varsei and S. Polyakovskiy, "Sustainable supply chain network design: A case of the wine industry in Australia," *Omega*, vol. 66, pp. 236-247, 2017.
- [12] H. Baroud, K. Barker, J. E. Ramirez-Marquez, and C. M. Rocco, "Inherent costs and interdependent impacts of infrastructure network resilience," *Risk Analysis*, vol. 35, no. 4, pp. 642, 66-2015.
- [13] V. Gupta, B. He, and S. P. Sethi, "Contingent sourcing under supply disruption and competition," *International Journal of Production Research*, vol. 53, no. 10, pp. 3006-3027, 2015.
- [14] W. Ho, T. Zheng, H. Yildiz, and S. Talluri, "Supply chain risk management: a literature review," *International Journal of Production Research*, vol. 53, no. 16, pp. 5031-5069, 2015.
- [15] S. Rezapour, R. Z. Farahani, and M. Pourakbar, "Resilient supply chain network design under competition: a case study," *European Journal of Operational Research*, vol. 259, no. 3, pp. 1017-1035, 2017.
- [16] B. Fahimnia and A. Jabbarzadeh, "Marrying supply chain sustainability and resilience: A match made in heaven," *Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review*, vol. 91, pp. 306-324, 2016.
- [17] Zahiri, B., Zhuang, J., & Mohammadi, M. Toward an integrated sustainable-resilient supply chain: A pharmaceutical case study. *Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review*, 103, 109-142, 2017.
- [18] D. Ivanov, "Revealing interfaces of supply chain resilience and sustainability: a simulation study," *International Journal of Production Research*, vol. 56, no. 10, pp. 3507-3523, 2018.
- [19] A. Jabbarzadeh, B. Fahimnia, and F. Sabouhi, "Resilient and sustainable supply chain design: sustainability analysis under disruption risks," *International Journal of Production Research*, pp. 24-1, 2018.
- [20] G. Mavrotas, "Effective implementation of the ϵ -constraint method in multi-objective
- [1] Jabbarzadeh, M. Haughton, and A. Khosrojerdi, "Closed-loop supply chain network design under disruption risks: A robust
- [2] D. Simchi-Levi, P. Kaminsky, and E. Simchi-Levi, *Managing The Supply Chain: Definitive Guide*. Tata McGraw-Hill Education, 2004.
- [3] H. Carvalho, S. G. Azevedo, and V. Cruz-Machado, "Agile and resilient approaches to supply chain management: influence on performance and competitiveness," *Logistics research*, vol. 4, no. 1-2, pp. 49-62, 2012a.
- [4] H. Carvalho, V. Cruz-Machado, and J. G. Tavares, "A mapping framework for assessing supply chain resilience," *International Journal of Logistics Systems and Management*, vol. 12, no. 3, pp. 354-373, 2012b.
- [5] Y. Sheffi, J. B. Rice, J. M. Fleck, and F. Caniato, "Supply chain response to global terrorism: a situation scan," in Center for Transportation and Logistics, MIT, Department of Management, Economics and Industrial Engineering, Politecnico di Milano, EurOMA POMS Joint International Conference, 2003.
- [6] R. Rajesh and V. Ravi, "Supplier selection in resilient supply chains: a grey relational analysis approach," *Journal of Cleaner Production*, vol. 86, pp. 343-359, 2015.
- [7] S. Derissen, M. F. Quaas, and S. Baumgärtner, "The relationship between resilience and sustainability of ecological-economic systems," *Ecological Economics*, vol. 70, no. 6, pp. 1121-1128, 2011/04/15/ 2011.
- [8] M. Varsei and S. Polyakovskiy, "Sustainable supply chain network design: A case of the wine industry in Australia," *Omega*, vol. 66, pp. 236-247, 2017.
- [9] S. Derissen, M. F. Quaas, and S. Baumgärtner, "The relationship between resilience and sustainability of ecological-economic systems," *Ecological Economics*, vol. 70, no. 6, pp. 1121-1128, 2011/04/15/ 2011.
- [10] R. Babazadeh, J. Razmi, M. S. Pishvae, and M. Rabbani, "A sustainable second-generation biodiesel supply chain network design problem under risk," *Omega*, vol. 66, pp. 258-277, 2017.

clearing considering dynamic security by lexicographic optimization and augmented epsilon constraint method," *Applied Soft Computing*, vol. 11, no. 4, pp. 3858-3846, 2011.

mathematical programming problems," *Applied mathematics and computation*, vol. 213, no. 2, pp. 455-465, 2009.

[21] J. Aghaei, N. Amjady, and H. A. Shayanfar, "Multi-objective electricity market