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

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

امید بویرحسنی
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 تامین 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 سبد تأمین تاب‌آور، می‌تواند میزان ریسک و آسیب‌پذیری زنجیره‌های‌تأمین 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 بیشنه‌سازی نمرات اجتماعی و زیست‌محیطی تأمین‌کنندگان و همچنین کمینه‌سازی تأخیر در تحویل محصولات پرداخته می شود، و از دو روش اپسیلون محدودیت تکامل‌یافته و Lp متریک برای موازنه اهداف استفاده می‌شود. نهایتا، با استفاده از مثال عددی وتحلیل حساسیت کارایی مدل اثبات می‌شود.

کلمات کلیدی: برنامه‌ریزی زنجیره‌تأمین، پایداری، تاب‌آوری، اختلال تأمین، بهینه‌سازی چندهدفه، Lp متریک، اپسیلون محدودیت تکامل‌یافته

۱- مقدمه

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 می توان 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 شرکت های 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 کارائی و اثربخشی یک شرکت می‌باشد.

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

تاریخ دریافت: ۱۳۹۸/۰۷/۱۷ / تاریخ پذیرش: ۱۳۹۸/۰۹/۲۶
دوره ۹ / شماره ۳
صفحات: ۲۲۵-۲۱۲

*(Corresponding author) omidboyer@gmail.com

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 زیست‌محیطی وغیره . هدف از تاب‌آوری زنجیره‌تأمین 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 زنجیره‌تأمین به شمار می‌آید. انتخاب تأمین-کنندگان یک مسئله تصمیم‌گیری چند معیاره است که ملاحظات در مشخصات کمی و کیفی را در برمی‌گیرد. انتخاب تأمین-کنندگان 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 می-تواند نقش مهمی را در بهبود عملکرد زنجیره‌های تأمین ایفا نماید [۷].

طی سال های اخیر و با وجود افزایش توجهات نسبت به پیامدهای اجتماعی و زیست محیطی فعالیت‌های کسب و کار و همچنین شیوع گسترده چالش های مرتبط با پایداری، برنامه ریزی و طراحی شبکه‌های زنجیره تأمین، توسعه یافته و باعث شده تا صورت جدیدی از زنجیره های تأمین مانند زنجیره های 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 شبکه های زنجیره تأمین آشکار می-نماید. 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 تاثیرات زیست‌محیطی و اجتماعی در کنار هدف مرسوم "افزایش سودآوری" توسط الکینگتون معرفی شده است [۸].

تعریف و تحقق اهداف سازمانی در راستای اهداف توسعه پایدار می بایست ، 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 اولا ممکن است با ناتوانی شرکت مرکزی در هماهنگ‌سازی و مدیریت تأمین کنندگان همراه باشد و ثانیا 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 تاب-آوری 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 تاب-آوری و نهایتا ارائه یک بینش مدیریتی، که در آن میزان توجه به اختلال و تاب‌آوری زنجیره‌تأمین 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 پیشنهاد هایی برای تحقیقات آینده ارایه می‌گردد.

۲- پیشینه تحقیق

علم پایداری و تئوری تاب‌آوری در زنجیره‌تأمین، 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 زنجیره‌تأمین مورد توجه قرار داده‌اند، مرور می‌شوند.

بابازاده و همکاران [۱۰] به طراحی یک شبکه زنجیره‌تأمین بازتولید بیودیزل پرداخته‌اند. در این مدل پیشنهادی، کمینه-سازی هزینه کل زنجیره‌تأمین بیودیزل و کمینه‌سازی تأثیرات زیست‌محیطی ناشی از آن، در شرایط عدم‌قطعیت 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 استقراریافته، گردش موجودی و ... تحت مفروضات واقعی تعیین می‌گردد. ورسی و پولیاکووسکی [۱۱]، مدل‌سازی و طراحی یکشبکه زنجیره‌تأمین پایدار را با درنظرگیری ملاحظات و ابعاد

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 انتشاریافته 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 سودآوردترین شبکه و سیاست‌های کاهش ریسک استفاده کرده‌اند.

فهیمی‌نیا و جبارزاده [۱۶] در مقاله‌ای به بررسی ابعاد پایداری و تاب‌آوری در سطح طراحی یک شبکه زنجیره‌تأمین پرداخته‌اند. در این تحقیق یک مدل بهینه سازی چندهدفه ارائه شده است که از رویکرد امتیازدهی عملکرد پایدار، به منظور کمی‌سازی عملکرد اجتماعی و زیست‌محیطی زنجیره‌تأمین استفاد 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 عدم قطعیت توسعه داده‌اند. در این مقاله، نویسندگان به منظور رویارویی با شرایط عدم قطعیت، یکرویکرد برنامه‌ریزی تصادفی-احتمالی فازی جدید را توسعه داده‌اند. در این تحقیق معیارهای جدیدی از تاب‌آوری و پایداری معرفی و مورد استفاده قرار گرفته است: کمینه‌سازی هزینه کل، بیشینه‌سازی رضایت اجتماعی، کمینه‌سازی معیارهای تاب‌آوری از پیش تعیین شده زیست‌محیطی، 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 درنظرگیری 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 می تواند 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 کمینه‌سازی تأخیر در تحویل
- ارائه یک رویکرد کنترلی مناسب به منظور تعیین نرخ بهینه توجه به اختلال و شرایط معمول تجاری

۳- مدل پیشنهادی

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

در این تحقیق، یک زنجیره‌تأمین 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 احداث‌شده ساخته می‌شود و نهایتا از طریق مراکز توزیع محصولات از کارخانه‌ها به بازار عرضه می‌شود. طراحی بهینه این زنجیره‌تأمین با در نظر گرفتن پایداری و تاب‌آوری زنجیره‌تأمین مورد توجه است.

برنامه‌ریزی بهینه در مورد تصمیمات استراتژیک/راهبردی طراحی این شبکه زنجیره‌تأمین (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 زنجیره‌تأمین تحقق یابد. علاوه بر این هدف، با توجه به: ۱- نمره متفاوت تأمین‌کنندگان در عملکرد زیست‌محیطی و عملکرد اجتماعی، و ۲- تفاوت درصد تحویل با تأخیر تأمین‌کنندگان، سه هدف اجتماعی، زیست‌محیطی و مشتری‌مداری (تحویل به موقع) نیز مورد توجه قرار می‌گیرد.

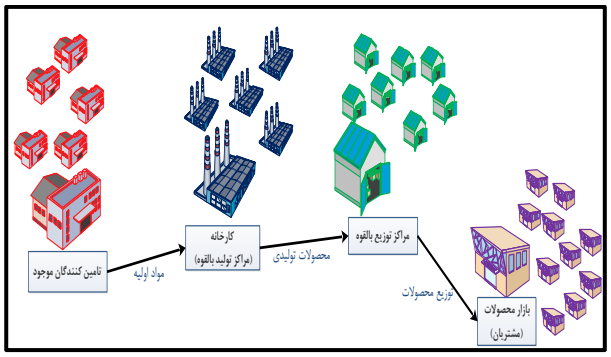
در این تحقیق به مدل‌سازی و حل مسئله برنامه‌ریزی پایدار و تاب‌آور یک شبکه زنجیره‌تأمین چهارسطحی پرداخته می‌شود. محل، ظرفیت و هزینه تأمین‌کنندگان مشخص است ولی تأمین‌کنندگان با احتمالاتی معین تحت شکست/اختلال قرار گیرند. در این زنجیره‌تأمین، باید محل احداث کارخانه‌ها و مراکز توزیع و ظرفیت آنها را تعیین کنند 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 زنجیره‌تأمین، اهداف اجتماعی و زیست-محیطی بیشنه‌سازی نمرات اجتماعی و زیست‌محیطی تأمین-کنندگان 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 زنجیره‌تأمین (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 ذخیره-سازی دارند و زوال آنها ناچیز است.
- یک مدل حمل و نقل در نظر گرفته می‌شود و ظرفیت حمل و نقل محدود است.



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 ونقل 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 ریسک‌های 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 n(kg)
d_{ij}	پیش‌بینی تقاضا برای محصول i در منطقه فروش j
f_n	هزینه ثابت ارزیابی وانتخاب تأمین‌کننده n
f'_{um}	هزینه ثابت تأسیس کارخانه با سطح ظرفیت u در منطقه m
f''_{vw}	هزینه ثابت تأسیس مرکزتوزیع با سطح ظرفیت v در منطقه w
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 ازدست رفته ماده خام r
h'_{im}	زمان فرآیند برای تولید هر واحد از محصول i در کارخانه m
c'_{rnm}	ظرفیت تولید کارخانه با سطح ظرفیت u در منطقه (h)m
t'_{imwk}	هزینه انتقال هر واحد از محصول i از کارخانه m به مرکز توزیع w با استفاده از مدل انتقال k
t''_{iwjk}	هزینه انتقال هر واحد از محصول i از مرکز توزیع w به منطقه فروش j با استفاده از مدل انتقال k
h''_i	حجم هر واحد از محصول $i(m^3)$
c''_{vw}	ظرفیت گنجایش مرکز توزیع با سطح ظرفیت v در منطقه w
e_{rnm}	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
z'_{rnm}	قیمت هر واحد خریداری شده و انتقال داده شده ماده خام r از تأمین‌کننده پشتیبان n برای کارخانه m در هنگام شکست تأمین
d'_{rnm}	درصد تخفیف پیشنهادی برای ماده خام r از تأمین‌کننده n برای کارخانه m
z_{rnm}	هزینه قرارداد هر واحد ظرفیت اضطراری پیش‌بینی شده ماده خام r از تأمین‌کننده n برای کارخانه m
p'_n	احتمال رخ دادن یک اتفاق منحصربفرد که باعث شکست تأمین‌کننده n
B_{rn}^{max}	حداکثر ظرفیت اضطراری برای ماده خام r از تأمین‌کننده n
β_{rnm}	درصد نحویل با تأخیر ماده اولیه r از تأمین‌کننده n برای کارخانه m که موجب تأخیر در تحویل تقاضای مشتریان می‌شود.
Ψ	میزان توجه به شرایط معمول تجاری

متغیرهای تصمیم

X_n	برابر ۱ اگر تأمین‌کننده n انتخاب شود.
X'_{um}	برابر ۱ اگرکارخانه با سطح ظرفیت u در مکان m استقرار یابد.
X''_{vw}	برابر ۱ اگر مرکزتوزیع 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

Y_{imwk} مقدار محصول i که از کارخانه m به مرکزتوزیع w با مدل انتقال k انتقال می‌یابد.

Y'_{iwjk} مقدار محصول i که از مرکزتوزیع w به منطقه فروش j با مدل انتقال k انتقال می‌یابد.

B_{rnm} مقدار ظرفیت اضطراری از ماده خام r که به تأمین‌کننده n برای کارخانه m از باقیمانده ظرفیت اختصاص می‌دهیم.

توابع هدف

$$minZ_1 = \Psi\left[\sum_{n\in N} f_n X_n + \sum_{u\in U}\sum_{m\in M} f'_{um}X'_{um} + \sum_{v\in V}\sum_{w\in W} f''_{vw}X''_{vw} + \sum_{r\in R}\sum_{n\in N}\sum_{m\in M} t_{rnm}Q_{rnm}(1-d_{rnm}) + \sum_{i\in I}\sum_{m\in M} g_{im}p_{im} + \sum_{i\in I}\sum_{m\in M}\sum_{w\in W}\sum_{k\in K} t'_{imwk}Y_{imwk} + \sum_{i\in I}\sum_{w\in W}\sum_{j\in J}\sum_{k\in K} t'_{iiwjk}Y'_{iwjk}\right] + (1-\Psi)\left[\sum_{r\in R} g'_r\left(\sum_{i\in I}\sum_{j\in J} d_{ij}h_{ri} - min\left[\sum_{i\in I}\sum_{j\in J} d_{ij}h_{ri}, \sum_{n\in N}\sum_{m\in M} Q_{rnm} + B_{rnm}\right]\right)\prod_{n\in F} p'_n \prod_{n\in(E-F)}(1-p'_n) + \sum_{r\in R}\sum_{n\in N}\sum_{m\in M} z_{rnm}B_{rnm} + \sum_{r\in R}\sum_{n\in N}\sum_{m\in M} z'_{rnm}\left(min\left[\sum_{r\in R}\sum_{i\in I}\sum_{j\in J} h_{ri}d_{ij} - \sum_{r\in R}\sum_{S_n\in E-F}\sum_{m\in M} Q_{rnm}, \sum_{r\in R}\sum_{n\in E-F}\sum_{m\in M} B_{rnm}\right]\prod_{n\in F} p'_n \prod_{n\in(E-F)}(1-p'_n)\right)\right] \quad (۱)$$

- هدف اقتصادی مسأله شامل هزینه ارزیابی و انتخاب تأمین‌کننده، هزینه استقرار کارخانه، هزینه استقرار مراکزتوزیع، هزینه مواد خام، هزینه تولید، هزینه انتقال از کارخانه به مراکزتوزیع، 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 زنجیره‌تأمین را نشان می‌دهد. این پارامتر در بخش نتایج عددی تحقیق به طور کامل تحلیل می‌شود.
- $\prod_{S_n\in F} p'_n \prod_{S_n\in(E-F)}(1-p'_n)$ ، در این 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 می‌دهدو در نتجه عملکرد زیست‌محیطی زنجیره بهبود می‌یابد.

$$maxZ_3 = \sum_{r\in R}\sum_{n\in N}\sum_{m\in M} e'_{rnm}(Q_{rnm} + B_{rnm}) \quad (۳)$$

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

$$maxZ_4 = \sum_{r\in R}\sum_{n\in N}\sum_{m\in M} \beta_{rnm}(Q_{rnm} + B_{rnm}) \quad (۴)$$

- 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

$$\sum_{u\in U} X'_{UM} \le 1 \;;\forall m \in M \quad (۵)$$

- بیش از یک کارخانه در یک مکان کاندید نمی‌توان احداث کرد.

$$\sum_{v\in V} X''_{uw} \le 1 \;;\forall w \in W \quad (۶)$$

- بیش از یک مرکز توزیع در یک مکان کاندید نمی‌توان احداث کرد.

$$Q_{rnm} \le a'_{rnm} X_n \;;\forall r \in R, \forall n \in N, \forall m \in M \quad (۷)$$

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

$$\sum_{n\in N} Q_{rnm} = \sum_{i\in I} h_{ri} p_{im} \;;\forall r \in R, \forall m \in M \quad (۸)$$

- تکمیل مواد خام در کارخانه ها را تضمین می‌کند.

$$p_{im} = \sum_{w\in W}\sum_{k\in K} Y_{imwk} \;;\forall i \in I, \forall m \in M \quad (۹)$$

- تعادل جریان محصول در کارخانه ها را تضمین می‌کند.

$$\sum_{m\in M}\sum_{k\in K} Y_{imwk} = \sum_{j\in J}\sum_{k\in K} Y'_{iwjl} \;;\forall i \in I, \forall w \in W \quad (۱۰)$$

- تعادل جریان محصول در مراکز توزیع را تضمین می‌کند.

$$\sum_{w\in W}\sum_{k\in K} Y'_{iwjk} + \left(d_{ij} - min\left[d_{ij}, \sum_{m\in M} p_{im}\right]\right) = d_{ij} \;;\forall i \in I, \forall j \in J \quad (۱۱)$$

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

$$\sum_{m\in M} Q_{rnm} \le \left(1 - p'_n\right) c_{rn} X_n \;;\forall r \in R, \forall n \in N \quad (۱۲)$$

- محدودیت ظرفیت تأمین‌کنندگان

$$\sum_{i\in I} h'_{im} p_{im} \le \sum_{u\in U} c'_{um} X'_{um} \;;\forall m \in M \quad (۱۳)$$

- محدودیت ظرفیت کارخانه ها

$$\sum_{i\in I}\sum_{m\in M}\sum_{k\in K} h''_i Y_{imwk} \le \sum_{v\in V} c''_{vw} X''_{vw} \;;\forall w \in W \quad (۱۴)$$

- محدودیت ظرفیت مراکز توزیع

$$0 \le B_{rnm} \le C_{rn} - \sum_{m\in M} Q_{rnm} \;;\forall r \in R, n \in N, m \in M \quad (۱۵)$$

- محدودیت مقدار ظرفیت اضطراری

$$B_{rnm} \le B_{rn}^{max} \;;\forall r \in R, n \in N, m \in M \quad (۱۶)$$

- بیشینه ظرفیت اضطراری برای هر تأمین‌کننده

$$X_n , X'_{um} , X''_{vw} \in \{0,1\} \quad (۱۷)$$

$$Q_{rnm} , P_{im} , Y_{imwk} , Y'_{iwjk} , B_{rnm} \ge 0 \quad (۱۸)$$

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):

$$\begin{cases} Min\ (f_1(x), f_2(x), \dots, f_n(x)) \\ x \in X \end{cases} \quad (۱۹)$$

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 جوا ب $F^* = (f_1^*, f_2^*, \dots, f_n^*)$ به عنوان جواب ایده‌آل در

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 نُرم اندازه‌گیری فاصله در نظر گرفته می‌شود و فاصله با نرم p به صورت زیر تعریف می‌شود:

$$Norm_p(F^*, F^A) = |F^* - F^A|_p = \left(\sum_{i=1}^{n} w_i (f_i^* - f_i(x^A))^p\right)^{\frac{1}{p}} \quad (۲۰)$$

که در آن w_i، وزن یا اهمیت نسبی هر هدف را نشان می‌دهد (که معمولاً توسط تصمیم‌گیرنده از پیش مشخص می‌شود). در این تحقیق حل مدل با نرم‌های $p=1,2,\infty$ انجام می‌شود.

۵- روش اپسیلون محدویت تکامل‌یافته برای تحلیل جبهه پارتو

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

$$\begin{cases} Min\ \ f_1(x) \\ f_i(x) \le e_i\ i = 2.3. \dots . n \\ x \in X \end{cases} \quad (۲۱)$$

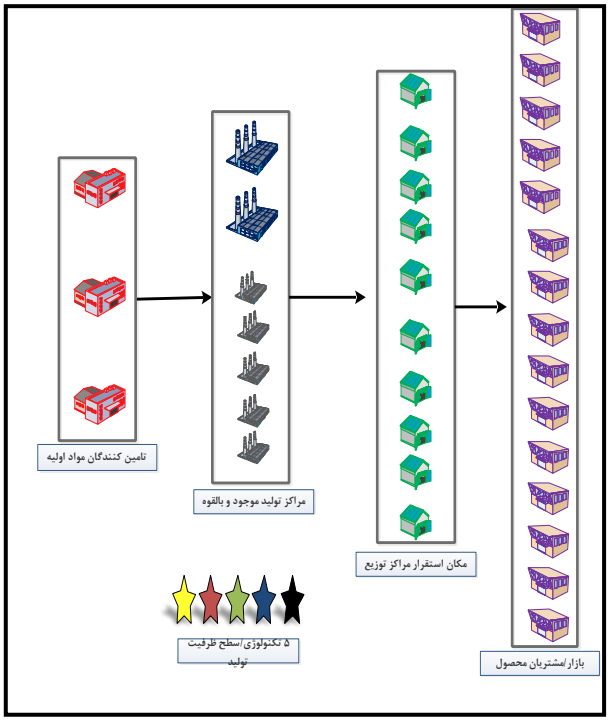
که در آن هدف اول، به عنوان هدف اصلی در نظر گرفته شده است و اهداف دوم تا nام به مقدار حداکثر e_i محدود می‌شوند. در روش اپسیلون محدودیت (۲۲)، با تغییر مقادیر e_i جواب‌های مختلفی به دست می‌آید که ممکن است کارا نباشند (کارای ضعیف هستند). با اصلاح/تکمیل مدل (۲۱)، می‌توان مشکل مذکور را رفع کرد که به روش اپسیلون محدودیت تکامل‌یافته (AEC) معروف است [۲۰]. در روش AEC، مدل (۲۱) به صورت زیر بازنویسی می‌گردد:

$$\begin{cases} Min\ \ f_1(x) - \sum_{i=2}^{n} \phi_i s_i \\ f_i(x) + s_i = e_i\ i = 2.3. \dots . n \\ x \in X \\ s_i \ge 0 \end{cases} \quad (۲۲)$$

که در آن s_iها متغیرهای نامنفی کمکی و ϕ_i یک پارامتر برای نرمال‌سازی اهداف هستند. با بدست آوردن ماتریس پی‌آمد اهداف مسئله با روش لکسیکوگرافیک [۲۱]، چندین مقدار مختلف $e_i \in [\mathrm{Min}(f_i).\mathrm{Max}(f_i)]$ انتخاب می‌شود و جبهه پارتو بدین طریق بدست می‌آید.

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 می‌شود و از نرم‌افزار GAMS نسخه 24.7.1، استفاده شده است. به منظور مطالعه عددی مسئله مورد نظر تحقیق، یک شبکه زنجیره‌تأمین بالقوه و داده‌های آن در جدول ۱ ملاحظه می‌شود. فرض شده است این زنجیره‌تأمین در حال حاضر ۲ کارخانه تولیدی فعال دارد که هر یک از آنها مجهز به تکنولوژی تولید با ظرفیت و استاندار مشخصی است؛ ۵ مکان بالقوه برای احداث مراکز تولید، ۱۰ مکان بالقوه برای استقرار مراکز توزیع، ۱۵ بازار/مشتری موجود است. نهایتا از طریق ۳ تأمین‌کننده مواد اولیه تأمین می‌شود.



شکل ۲: شبکه زنجیره‌تأمین مطالعه عددی مسئله SCLSC

جدول ۱. داده‌های مطالعه عددی مسئله

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

M	مجموعه مکان‌های کاندید برای کارخانه‌ها	۵
W	مجموعه مکان‌های کاندید برای مراکز توزیع	۱۰
J	مجموعه مناطق فروش	۱5
U	مجموعه سطوح ظرفیت در کارخانه‌ها	۵
V	مجموعه سطوح ظرفیت در مراکز توزیع	2
K	مجموعه مدل‌های حمل ونقل محصول	2
F	مجموعه تأمین‌کنندگانی که در یک زمان تحت سناریو شکست تأمین قرار می‌گیرند.	3
E	مجموعه همه تأمین‌کنندگان انتخاب شده	3
$E-F$	مجموعه تأمین‌کنندگانی که تحت سناریو ریسک‌های شکست، شکست نمی‌خورند.	2

پارامترهای ورودی

c_{rn}	ظرفیت تأمین ماده خام r بوسیله تأمین‌کننده n(kg)	U(300-500)
h_{ri}	مقدار ماده خام r که برای یک واحد از محصول i مورد نیاز است (kg)	U(5-7)
S_n	تأمین‌کننده n	U(1-3)
a'_{rnm}	برابر ۱ اگر تأمین‌کننده n در دسترس باشد برای تأمین ماده خام r برای کارخانه m	1
d_{ij}	پیش‌بینی تقاضا برای محصول i در منطقه فروش j	U(200-300)
f_n	هزینه ثابت ارزیابی وانتخاب تأمین‌کننده n	U(900-1000)
f'_{um}	هزینه ثابت تأسیس کارخانه با سطح ظرفیت u در منطقه m	U(1000-1200)
f''_{vw}	هزینه ثابت تأسیس مرکزتوزیع با سطح ظرفیت v در منطقه w	U(500-700)
t_{rnm}	هزینه متغیر خرید ماده خام r از تأمین‌کننده n برای کارخانه m	U(3-5)
g_{im}	هزینه متغیر تولید هر واحد از محصول i در کارخانه m	U(10-12)
g'_r	هزینه هر واحد از فروش ازدست رفته ماده خام r	U(15-26)
h'_{im}	زمان فرآیند برای تولید هر واحد از محصول i در کارخانه m	U(1-3)
c'_{rnm}	ظرفیت تولید کارخانه با سطح ظرفیت u در منطقه m(h)	1000
t'_{imwk}	هزینه انتقال هر واحد از محصول i از کارخانه m به مرکز توزیع w با استفاده از مدل انتقال k	U(2-5)
t''_{iwjk}	هزینه انتقال هر واحد از محصول i از مرکز توزیع w به منطقه فروش j با استفاده از مدل انتقال k	U(3-6)
h''_i	حجم هر واحد از محصول i(m^3)	1
c''_{vw}	ظرفیت گنجایش مرکز توزیع با سطح ظرفیت v در منطقه w	1000
e_{rnm}	رتبه عملکرد محیطی تأمین‌کننده n برای تولید ماده خام r برای کارخانه m	U(0.5-0.9)
e'_{rnm}	رتبه عملکرد اجتماعی تأمین‌کننده n برای تولید ماده خام r برای کارخانه m	U(0.5-0.9)
z'_{rnm}	قیمت هر واحد خریداری شده و انتقال داده شده ماده خام r از تأمین‌کننده پشتیبان n برای کارخانه m در هنگام شکست تأمین	U(2-4)
d'_{rnm}	درصد تخفیف پیشنهادی برای ماده خام r از تأمین‌کننده n برای کارخانه m	U(0.1-0,2)
z_{rnm}	هزینه قرارداد هر واحد ظرفیت اضطراری پیش‌بینی شده ماده خام r از تأمین‌کننده n برای کارخانه m	U(50-60)
p'_n	احتمال رخ دادن یک اتفاق منحصربفرد که باعث شکست تأمین‌کننده n	U(0.1-0.4)
B_{rn}^{max}	حداکثر ظرفیت اضطراری برای ماده خام r از تأمین‌کننده n	U(500-600)
β_{rnm}	درصد تحویل با تأخیر ماده اولیه r از تأمین‌کننده n برای کارخانه m که موجب تأخیر در تحویل تقاضای مشتریان می‌شود.	0.05

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 ($(1-\Psi)=0$). 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

(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 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 $\psi = 0.7 \rightarrow (1-\psi) = 0.3$ در مدل چندهدفه پیشنهادی مسئله قرار داده می‌شود (در بخش آتی به صورت مجزا به تحلیل این ضریب و استخراج بینش مدیریتی پرداخته می‌شود).

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

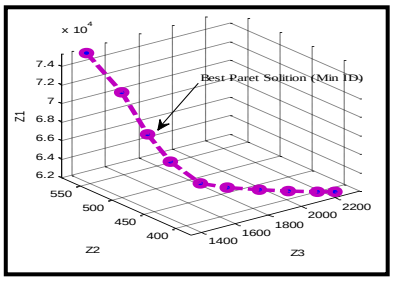
	مقدار اهداف				انحراف از بهینگی			
نرم	Z1	Z2	Z3	Z4	d1	d2	d3	d4
$\|Lp\|:=1$	16423.16	685.53	631.90	43.12	0.08	0.28	0.29	0.87
$\|Lp\|:=2$	17365.05	685.53	627.13	43.12	0.14	0.28	0.30	0.87
$\|Lp\|:=\infty$	17701.54	622.13	605.42	39.19	0.16	0.34	0.32	0.74

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 جوای‌های پارتو روش AEC، معیار نرمال‌شده 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.

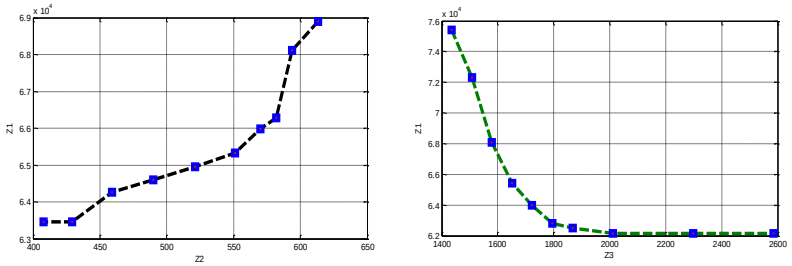
نمودار جبهه پارتو هدف اقتصادی نسبت به اهداف اجتماعی و زیست محیطی به ترتیب در شکل‌های ۳ و ۴ نشان داده می‌شود. ابتدا مقادیر هدف اجتماعی و زیست محیطی در حالت بهینه خود تنظیم شده‌اند و مقدار هدف اقتصادی محاسبه شده است؛ سپس با انعطاف در اهداف اجتماعی و زیست محیطی، مقدار بهینه هزینه محسابه شده است. ملاحظه 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 نسیت به هدف زیست محیطی بیشتر دیده می‌شود.

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 ۳. نمودار جبهه پارتو و جواب منتخب



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

جدول ۵ موازنه بین هدف اقتصادی و اهداف زیست‌محیطی و اجتماعی

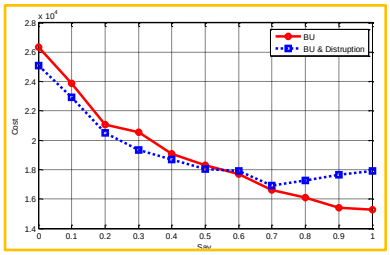
موازنه هدف اقتصادی و زیست‌محیطی				موازنه هداف اقتصادی و اجتماعی			
هزینه	Z2	انحراف از Z2 بهینه (%)	بهبود هزینه (%)	هزینه	Z3	انحراف از Z3 بهینه (%)	بهبود هزینه (%)
75403	1436	0	-	68903	613	0	-
72296.4	1507.8	5	4.12	68110.62	594	3	1.15
68066.29	1579.6	10	9.73	66284.69	582	5	3.8
65412.1	1651.4	15	13.25	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

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

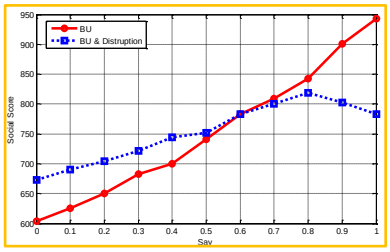
به شکل‌های ۵، ۶ و ۷ توجه کنید که به ترتیب مقادیر اهداف اقتصادی، اجتماعی و زیست‌محیطی را نسبت به تغییرات ضریب ψ نشان می‌دهد. در این تحلیل عددی، با تغییر $0 \leq \psi \leq 1$ مقادیر هدف در دو حالت (حالتI- فقط شرایط تجاری و حالتII - شرایط تجاری و سناریوهای اختلال محاسبه می‌شود. با مقدار $\psi = 0$ شروع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

به سناریوهای اختلال محتمل‌الوقوع توجه می‌کند. واضح است در $\psi = 0$، چون اصلا شرایط معمول تجاری مورد توجه قرار نگرفته است، مقدار اهداف پایداری در حالتI در بدترین مقدار قرار دارد. با افزایش ψ، مطمئنا مقدار اهداف در حالتI بهبود خواهد داشت ولی لزومی ندارد در حالتII نیز بهبود ایجاد شود. در صورت بهبود همه اهداف پایداری در حالتII، مطمئنا افزایش ψ کاملا توجیه پایداری دارد.

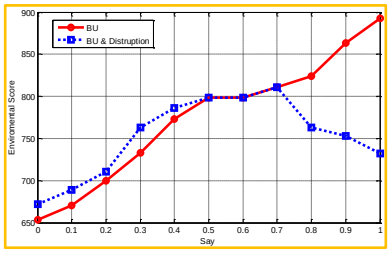
به عنوان مثال، در مطالعه موردی مطرح‌شده در این تحقیق، افزایش تا $\psi = 0.7$ کاملا موجه است. با ادامه روند افزایش ψ، ممکن است یکی از اهداف روند بهبود خود را از است دهد در حالی که یک یا چند هدف دیگر کماکان در حال بهبود باشد. در این صورت، افزایش ψ از منظر آن هدف که روند بهبود رو از دست داده دیگر موجه نیست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



شکل ۵. تحلیل اقتصادی تاثیر ψ



شکل ۶. تحلیل اجتماعی تاثیر ψ



شکل ۷. تحلیل زیست‌محیطی تاثیر ψ

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 منبع‌یابی چندگانه و اخذ قرارداد تأمین مواد اولیه با تأمین‌کنندگان 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 زنجیره تامین بشدت مختل می‌شود و اهداف اقتصادی، اجتماعی و حتی زیست‌محیطی به طور قابل‌ملاحظه‌ای از حالت بهینه انحراف می‌گیرید. 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 زنجیره تامین 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.

مراجع:

[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. Pishvaee, and M. Rabbani, "A sustainable second-generation biodiesel supply chain network design problem under risk," *Omega*, vol. ۶۶, pp. 258-277, 2017.

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

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