طراحی شبکه زنجیره تأمین جهانی با درنظرگرفتن پایداری و تاب‌آوری تحت عدم قطعیت

(مطالعه موردی: دستگاه اکسیژن‌ساز)

سعید حکیمی*: دانشجوی دکتری دانشگاه علامه طباطبایی، تهران، ایران Email: saeed_hakimi@atu.ac.ir
سید محمدعلی خاتمی فیروزآبادی: استاد گروه مدیریت صنعتی، دانشکده مدیریت و حسابداری دانشگاه علامه طباطبایی، تهران، ایران
مقصود امیری: استاد گروه مدیریت صنعتی، دانشکده مدیریت و حسابداری دانشگاه علامه طباطبایی، تهران، ایران
محمدتقی تقوی فرد: دانشیار گروه مدیریت صنعتی، دانشکده مدیریت و حسابداری دانشگاه علامه طباطبایی، تهران، ایران

تاریخ دریافت: ۱۴۰۰/۰۵/۱۹
تاریخ پذیرش: ۱۴۰۰/۰۹/۲۷

چکیده
در سال‌های اخیر رشد صنعت، تکنولوژی و رقابتی شدن بازار منجر به افزایش اهمیت مسئله طراحی شبکه زنجیره تأمین شده است. از سوی دیگر، بحران همه‌گیری کرونا منجر به ایجاد اختلالات فراوان در فرآیندهای لجستیک و زنجیره تأمین بسیاری از سازمان‌ها شده است. از این‌رو، این تحقیق به مطالعه مسئله طراحی شبکه زنجیره تأمین جهانی با درنظرگرفتن معیارهای پایداری و تاب‌آوری پرداخته است. بدین‌منظور، یک مدل برنامه‌ریزی ریاضی عدد صحیح مختلط چندهدفه جهت کمینه کردن هزینه‌ها و اثرات زیست‌محیطی و همچنین بیشینه کردن اثرات اجتماعی و تاب‌آوری زنجیره تأمین به گونه‌ای که عوامل زنجیره تأمین جهانی در آن لحاظ شده باشد، ارائه می‌شود. با توجه به پویایی و نوسان محیط کسب‌وکار عدم قطعیت یکی از چالش‌های اساسی مسئله زنجیره تأمین است. از این‌رو، تحقیق حاضر مسئله را تحت عدم قطعیت ترکیبی بررسی کرده و به‌منظور مقابله با عدم قطعیت از رویکرد بهینه‌سازی استوار فازی تصادفی استفاده می‌کند. سپس مسئله با استفاده از روش برنامه‌ریزی آرمانی چندگزینه‌ای حل می‌شود. با توجه به افزایش اهمیت تجهیزات پزشکی در همه‌گیری اخیر (ویروس کرونا) در این تحقیق مطالعه موردی در این صنعت صورت پذیرفته و زنجیره تأمین محصول دستگاه اکسیژن‌ساز بررسی می‌شود. در انتها هم با انجام آنالیز حساسیت بر روی پارامترهای کلیدی مدل ریاضی اثر آنها بر مسئله ارزیابی شده و بر این اساس پیشنهادات مدیریتی ارائه می‌شود.

واژگان کلیدی: زنجیره تأمین پایدار، زنجیره تأمین تاب‌آور، زنجیره تأمین جهانی، بحران همه‌گیری کرونا، دستگاه اکسیژن‌ساز

Global Supply Chain Network Design Considering Stability and Resilience under Uncertainty

A case study of an Oxygenator

Saeed Hakimi*[۱], Seyed Mohammad Ali Khatami FirouzAbadi[۲], Maghsoud Amiri[۳], Mohammad Taghi Taghavi Fard[۴]

Abstarct
In recent years, the growth of industry and technology and also competitive market have led to increasing the importance of the supply chain network design problem. Hence, this research studies the global supply chain network design problem considering sustainability and resiliency criteria. To do this, a multi-objective mixed-integer programming model is proposed to minimize the total costs and environmental impacts and also maximize the social impacts and resiliency such that the global factors are considered. Due to the fluctuation of the business environment, uncertainty is one of the major challenges of the supply chain problem. In this regard, the current study investigates the research problem under uncertainty and applied the fuzzy robust stochastic approach to tackle uncertainty. Afterwards, the proposed model is solved employing the multi-choice goal programming method. Due to increasing the importance of the medical devices in the recent pandemic (COVID۱۹-), this study selects a case study in this industry namely the oxygen concentrator device. Eventually, several sensitivity analyses have been conducted to examine the impact of the critical parameters on the research problem and managerial implications have been provided.

Keywords: *Sustainable supply chain, resilient supply chain, global supply chain, COVID19- Pandemic crisis, oxygen concentrator device*

۱ Ph.D. Student University of Allameh Tabataba'i, Tehran, Iran
۲ Prof., Faculty of Management University of Allameh Tabataba'i, Tehran, Iran
۳ Prof., Faculty of Management University of Allameh Tabataba'i, Tehran, Iran
۴ Associate Prof., Faculty of Management University of Allameh Tabataba'i, Tehran, Iran

مقدمه

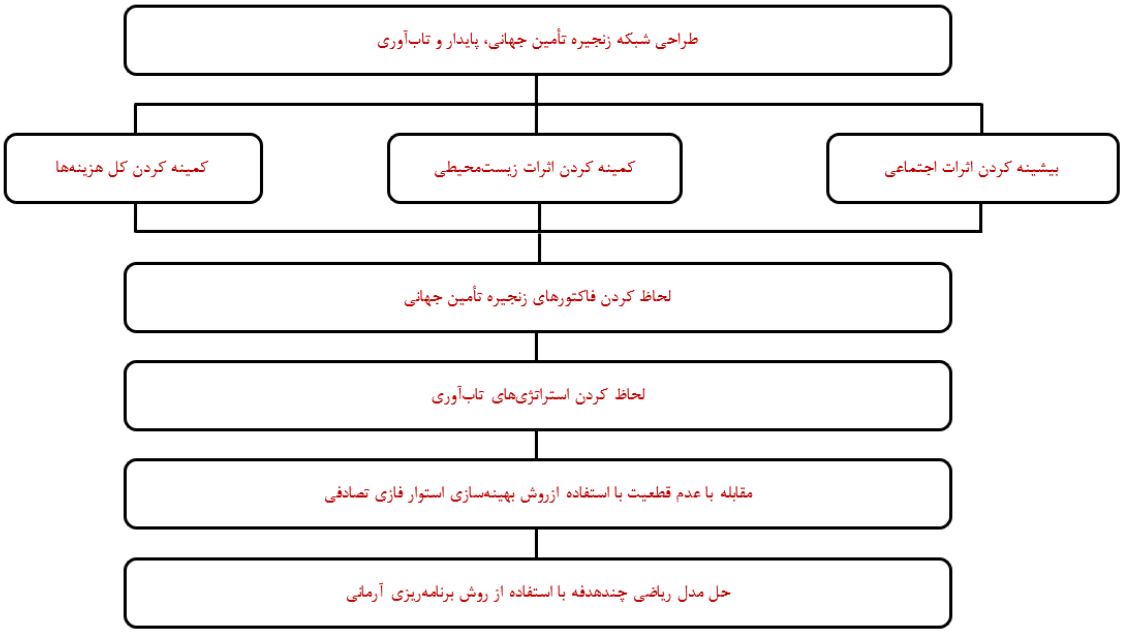
در سال‌های اخیر با افزایش روزافزون جمعیت و رشد چشمگیر تکنولوژی اهمیت مسئله مدیریت زنجیره تأمین بیش از پیش مورد توجه محققان و مدیران قرار گرفته است. امروزه مدیران به خوبی می‌دانند که در صورت عدم تنظیم برنامه مناسبی برای بهینه‌سازی شبکه زنجیره تأمین خود محکوم به حذف از بازار هستند. یکی از مهمترین زیرشاخه‌های مسئله مدیریت زنجیره تأمین مسئله طراحی شبکه زنجیره تأمین است که به دنبال طراحی بهینه شبکه زنجیره تأمین با توجه به معیارهای مورد نظر نیست. در این حوزه در رویکرد سنتی تنها جنبه‌های مالی و اقتصادی مسئله مورد توجه قرار می‌گرفت. بدان معنی که محققان و مدیران به‌منظور طراحی شبکه زنجیره تأمین تنها هدف کمینه کردن کل هزینه‌ها و یا بیشینه کردن سود را مورد نظر قرار می‌دادند [۱]. در ادامه با توجه به ایجاد مسائلی مانند افزایش دمای کل زمین، افزایش آلودگی اکوسیستم و غیره نگرانی‌های زیست‌محیطی افزایش یافت که منجر به ایجاد شاخه جدیدی در مسئله طراحی شبکه زنجیره تأمین به نام زنجیره تأمین سبز شد [۱]. در مسئله طراحی شبکه زنجیره تأمین سبز محققان در کنار درنظرگرفتن ابعاد مالی مسئله به‌دنبال لحاظ کردن معیارهای زیست‌محیطی مانند کمینه کردن انتشار گازهای گلخانه‌ای هم هستند. در ادامه موج تحقیقات به‌منظور دستیابی به ستون‌های توسعه پایدار (همزمان درنظرگرفتن ابعاد مالی، زیست‌محیطی و اجتماعی) محققان به طراحی شبکه‌های زنجیره تأمین پایدار پرداختند که در آن به‌صورت همزمان اهداف مالی، زیست‌محیطی و اجتماعی را دنبال می‌کردند [۱]. امروزه پایداری در مدیریت زنجیره تأمین به الزامی برای کسب وکارها تبدیل شده و توجه زیادی را از طرف دانشگاهیان و صنایع به خود جلب کرده است. به گفته محققان ۸۰ درصد از گازهای گلخانه‌ای و ۳۶ درصد از گاز دی اکسیدکربن منتشرشده در جو زمین به دلیل فعالیت‌های زنجیره تأمین است [۲]. بنابراین سازمان‌ها و شرکت‌ها باید از یک‌سو به سوددهی و مزیت رقابتی و از سوی دیگر به حداقل رساندن اثرات محیطی و اجتماعی فعالیت‌هایشان توجه کنند [۳]. با توجه به اهمیت ویژگی یادشده، در این تحقیق ابعاد پایداری در مسئله لحاظ می‌شود.

از سوی دیگر، زنجیره‌های تأمین همواره با تهدیدات و اختلالات طبیعی (مانند طوفان و زلزله) و غیرطبیعی (مانند انفجار و اعتصاب کارگران) روبه‌رو هستند. از این‌رو، درنظرگرفتن استراتژی‌هایی به‌منظور مقابله با این اختلالات بسیار ضروری به نظر می‌رسد. در ادبیات تحقیق به مجموعه‌ای از استراتژی‌ها که به‌منظور مقابله با اختلالات و تهدیدات بالقوه در نظر گرفته می‌شود، تاب‌آوری گویند [۴]. به‌صورت کلی، تاب‌آوری به معنای توانایی زنجیره تأمین به‌منظور ریکاوری در برابر حوادث و اختلالات در راستای تأمین تقاضای مشتریان در زمان مقرر است [۵]. به‌منظور درک بهتر مفهوم تاب‌آوری به مثال زیر دقت کنید. در زلزله سال ۲۰۱۱ کشور ژاپن بسیاری از شرکت‌ها و کارخانه‌ها دچار آسیب‌های فراوانی شدند. یکی از شرکت‌هایی که این حادثه صدمات فراوانی به آن وارد کرد، شرکت نیسان‌موتور بود. شواهد نشان می‌دهد که این شرکت نسبت به رقبای خود (سایر شرکت‌های صنعت خودروسازی) آسیب بیشتری را متحمل شده بود [۵]. اما از طرفی سرعت ریکاوری این شرکت در مقایسه با رقبای خود بسیار بالاتر بود؛ به‌طوری که پس از گذشت حدود ۶ ماه از حادثه نامبرده سایر رقبای این شرکت به‌طور متوسط حدود ۲۵ درصد کاهش تولید داشتند؛ در حالی که شرکت نیسان موتور تنها حدود ۴ درصد کاهش تولید داشت [۵]. این مثال به خوبی اهمیت بالای تاب‌آوری در مسئله زنجیره تأمین را شفاف می‌کند. با توجه به اهمیت ویژگی یادشده این تحقیق به دنبال لحاظ کردن استراتژی‌های تاب‌آوری در مسئله است.

با توجه به افزایش روابط بین کشورها در سال‌های اخیر و بین‌المللی شدن بازار محصولات مختلف امروزه مبحث زنجیره تأمین جهانی مورد توجه محققان قرار گرفته است. طی ۲ دهه گذشته شرکت‌های بین‌المللی سعی کرده‌اند از طریق گسترش مرزهای زنجیره تأمین خود وارد بازارهای نوظهور جهانی شوند. این گسترش امکان بهره‌گیری از فرصت‌های مختلف مانند منابع طبیعی و انسانی کم‌هزینه و مشوق‌های مالی ارائه‌شده توسط کشورهای دیگر را فراهم می‌کند [۶ و۷]. در این راستا شرکت اپل با استفاده از استراتژی‌های زنجیره تأمین جهانی صرفه‌جویی قابل توجهی در هزینه‌های خود داشته است [۸ و ۹]. همان‌طور که بیان شد، امروزه مسئله زنجیره تأمین جهانی جز مفاهیم مهم حوزه مدیریت زنجیره تأمین قرار می‌گیرد و در همین راستا در این تحقیق به مطالعه این مفهوم پرداخته شده است.

بحران همه‌گیری کرونا در حدود ۲ سال اخیر منجر به ایجاد اختلالات گسترده در تمامی سطوح از جمله کسب‌وکار شده است. این بیماری تمام دنیا را دچار بحران کرده و در این راستا استفاده از مفاهیم مدیریت بحران می‌تواند کارساز باشد. بحران پیشامدی است که به‌صورت ناگهانی و گاهی فزاینده رخ می‌دهد و به وضعیتی خطرناک و ناپایدار برای فرد، گروه یا جامعه می‌انجامد [۱۰ و ۱۱]. بحران باعث به وجود آمدن شرایطی می‌شود که برای برطرف کردن آن نیاز به اقدامات اساسی و فوق‌العاده است. در شرایط حساس کنونی مدیریت بحران مفهومی است که سازمان‌ها بیش از هر زمانی به آن می‌پردازند و دولت‌ها هم برای کاهش شدت و اثر مخاطرات خود از مباحث مربوط به مدیریت بحران بهره می‌گیرند. بحران کرونا اثرات فراوانی در فرآیندهای لجستیک و زنجیره تأمین گذاشته است که در این میان زنجیره تأمین تجهیزات پزشکی (با توجه به افزایش چشمگیر تقاضا برای محصولات آنها) بسیار تحت تأثیر قرار گرفته است. طبق گزارش سازمان بهداشت جهانی طی همه‌گیری کرونا تقاضا برای بسیاری از تجهیزات پزشکی چندبرابر شده که این امر منجر به ایجاد اختلالات فراوانی در زنجیره تأمین آنها شده است. یکی از پراستفاده‌ترین تجهیزات پزشکی در برهه همه‌گیری کرونا دستگاه اکسیژن‌ساز است. از این‌رو انگیزه‌های کافی برای این تحقیق به‌منظور مطالعه زنجیره تأمین دستگاه اکسیژن‌ساز به عنوان یکی از مهمترین تجهیزات پزشکی در بحران کرونا ایجاد شده است.

با توجه به اهمیت فراوان مواردی که گفته شد، در این تحقیق به مطالعه مسئله طراحی شبکه زنجیره تأمین جهانی با درنظرگرفتن ویژگی‌های پایداری و تاب‌آوری تحت شرایط عدم قطعیت پرداخته می‌شود. در این راستا یک مدل برنامه‌ریزی ریاضی چندهدفه به‌منظور کمینه کردن هزینه‌ها و آلودگی‌های زیست‌محیطی و بیشینه کردن اثرات اجتماعی به‌صورتی که عوامل جهانی بودن و تاب‌آوری در آن لحاظ شده باشد، ارائه می‌شود. سپس به‌منظور مقابله با عدم قطعیت از رویکرد بهینه‌سازی استوار فازی تصادفی و در ادامه هم به‌منظور حل مدل چندهدفه پیشنهادی از روش برنامه‌ریزی آرمانی استفاده می‌شود. مشکل اصلی که این تحقیق به آن می‌پردازد، طراحی یک شبکه زنجیره تأمین در شرایط عدم قطعیت است؛ به‌صورتی که به‌طور همزمان استراتژی‌های جهانی بودن، تاب‌آور بودن و پایدار بودن را دارا باشد. در راستای جهانی بودن درنظرگرفتن عواملی همچون نرخ تبدیل ارز و تعرفه‌های گمرکی از جمله عواملی است که در ادبیات تحقیق مورد توجه قرار گرفته است. در رابطه با تاب‌آوری استراتژی‌های مختلفی مانند ظرفیت مازاد، تأمین‌کنندگان پشتیبان و غیره در ادبیات در نظر گرفته شده و در رابطه با پایداری هم درنظرگرفتن همزمان فاکتورهای اقتصادی، زیست‌محیطی و اجتماعی در ادبیات تحقیق توصیه شده است. مهمترین مزیت این تحقیق در مقایسه با پژوهش‌های مشابه درنظرگرفتن ابعاد جهانی بودن، پایداری و تاب‌آوری در مسئله به‌صورت همزمان است. از سوی دیگر، این تحقیق به مطالعه یکی از مهمترین تجهیزات پزشکی در بحران کرونا به نام دستگاه اکسیژن‌ساز می‌پردازد که اهمیت این تحقیق از نظر کاربردی را بالا می‌برد. شکل ۱ نشان‌دهنده چارچوب تحقیق حاضر است.



شکل ۱: چارچوب کلی این تحقیق

شکل ۱: چارچوب کلی این تحقیق

مرور ادبیات

در این بخش به بررسی ادبیات تحقیق پرداخته می‌شود. گفتنی است که تمرکز این بخش بر پژوهش‌هایی است که ویژگی‌های ترکیبی (برای مثال پایدار-تاب‌آور) داشته‌اند. با توجه به اهمیت بالای مسئله زنجیره تأمین پایدار در سال‌های اخیر تحقیقات فراوانی در این حوزه انجام شده است(برای مثال نیری و همکاران [۱]، بیوکی و همکاران [۱۲]، گوویندان و همکاران [۱۳]، ژن و همکاران [۱۴]، پیشوایی و همکاران [۱۵]، قلی زاده و همکاران [۱۶]، رحیمی و همکاران [۱۷]، جوزدانی و گوویندان [۱۸]). از سوی دیگر در رابطه با مسئله زنجیره تأمین تاب‌آور هم تحقیقات فراوانی صورت پذیرفته است (برای مثال گلدبک و همکاران [۱۹]، رضاپور و همکاران[۵]، یاوری و ذاکر [۲۰]، طالعی زاده و همکاران [۲۱]، نامدار و همکاران [۲۲]). علاوه بر این در زمینه زنجیره تأمین جهانی هم علاقه‌مندان می‌توانند به تحقیقاتی مانند کاردوسو و همکاران [۲۳] و اوراتا و همکاران [۲۴] مراجعه کنند. از طرفی در سال‌های اخیر توجه به مسئله طراحی شبکه زنجیره تأمین با درنظرگرفتن ویژگی‌های ترکیبی مورد توجه محققان قرار گرفته است. در این راستا در سال های اخیر در رابطه با مسئله زنجیره تأمین پایدار و تاب‌آور مطالعات متعددی صورت گرفته که در این قسمت به معرفی آنها پرداخته می شود. ماری و همکاران [۲۵] یک مدل برنامه‌ریزی ریاضی به‌منظور طراحی شبکه زنجیره تأمین پایدار و تاب‌آور ارائه کردند. نویسندگان به‌منظور بررسی کارایی مدل ارائه‌شده یک مطالعه موردی واقعی در صنعت پوشاک در نظر گرفتند.

سوزا و همکاران [۲۶] با ارائه یک مدل برنامه‌ریزی خطی عدد صحیح مختلط چندهدفه به طراحی یک شبکه زنجیره تأمین تاب‌آور و پایدار در صنعت تولید قند پرداختند. اهداف این مسئله به‌صورت به حداکثر رساندن سود و به حداقل رساندن انتشار گازهای گلخانه‌ای است. در نهایت به‌منظور حل مسئله پیشنهادی از رویکرد اپسیلون محدودیت استفاده شده است. زمانیان و همکاران [۲۷] به بررسی مطالعه موردی واقعی از زنجیره تأمین پایدار و تاب‌آور در صنعت گاز طبیعی پرداختند. در این مطالعه بهینه‌سازی یک مدل چندهدفه و چند دوره ای با اهداف به بیشینه کردن درآمد کل، کمینه کردن هزینه‌های اقتصادی و زیست‌محیطی، به حداقل رساندن جریمه برای ظرفیت کم استفاده شده و به حداکثر رساندن سطح خدمات انجام شد. مسئله با استفاده از الگوریتم بهبودیافته اپسیلون محدودیت تقویت‌شده حل شد و نتایج بررسی شد. مهرجردی و شفیعی [۲۸] مسئله پایداری و تاب‌آوری را در یک زنجیره تأمین حلقه بسته چندمحصولی در صنعت تایر در نظر گرفتند. برای این منظور از متخصصان خواسته شد تا تأثیرات استراتژی‌های زنجیره تأمین بر معیارهای تاب‌آوری در متغیرهای زبانی را شناسایی کنند. سپس ماتریس حاصل با استفاده از تاپسیس فازی حل شد و اشتراک اطلاعات و منابع چندگانه به عنوان راهکارهای اول و دوم انتخاب شدند. بر این اساس یک مدل برنامه‌ریزی عدد صحیح مختلط چندهدفه جدید ارائه شد. تابع هدف های این مسئله به‌صورت کمینه کردن هزینه کل، مصرف انرژی، آلودگی و افزایش فرصت‌های شغلی است. در نهایت مدل با استفاده از نسخه بهبودیافته از روش اپسیلون محدودیت تقویت‌شده حل شد. لطفی و همکاران [۲۹] مدل بهینه‌سازی استواری برای طراحی شبکه زنجیره تأمین حلقه بسته پایدار و تاب‌آور با درنظرگرفتن ارزش شرطی در معرض ریسک در یک شرکت مونتاژ اتومبیل در ایران پیشنهاد کردند. در این مسئله یک مدل برنامه‌ریزی خطی عدد صحیح مختلط ۲ مرحله‌ای برای این مسئله پیشنهاد شد. علاوه بر این، مدل راستوار برای مقابله با عدم قطعیت استفاده شد. اهداف این مطالعه شامل به حداقل رساندن هزینه‌ها، کمینه کردن انتشار کربن و انرژی همراه با بیشینه کردن میزان اشتغال است. برای حل این مسئله از رویکرد ال‌پی متریک استفاده شد. از سویی دیگر، اخیراً مطالعاتی در حوزه مسئله زنجیره تأمین پایدار و جهانی صورت گرفته که برخی از آنها به شرح ذیل است. بشیری و همکاران [۳۰] با استفاده از الگوی مدل‌سازی شبیه‌سازی سیستم داینامیک خطرات پایداری را در زنجیره تأمین قهوه اندونزی-انگلیس بررسی کردند. پارامترهای مدل و سایر مؤلفه های مدل پویا از طریق مصاحبه با ذی‌نفعان اصلی در زنجیره تأمین قهوه با پشتیبانی از شواهد حاصل از بررسی ادبیات استخراج شدند. سپس این مدل قبل از اینکه برای بررسی ۵ سناریوی متفاوت برای درنظرگرفتن تغییرات پارامترهای سیستم استفاده شود، در مراحل مختلف تأیید و اعتبارسنجی شد. این تحقیق همچنین تأیید کرد که برای انتخاب سناریوی ترجیحی از ترکیب مدل شبیه‌سازی سیستم داینامیک و تکنیک تصمیم گیری چندمعیاره تاپسیس می توان استفاده کرد. همچنین برخی از مطالعات صورت‌گرفته در حوزه مسئله زنجیره تأمین تاب‌آور و جهانی شامل موارد ذیل است. حسنی و خسروجردی [۳۱] یک مدل برنامه‌ریزی غیرخطی عدد صحیح مختلط برای طراحی شبکه‌های استوار زنجیره تأمین جهانی تاب‌آور تحت عدم اطمینان در یک تولیدکننده جهانی تجهیزات پزشکی ارائه کردند. ۶ راهکار تاب‌آوری برای کاهش ریسک اختلالات همبسته ارائه شده است. در این مسئله عدم اطمینان در پارامترهای هزینه‌های خرید و تقاضا در نظر گرفته شده است. هدف مسئله پیشنهادی به حداکثر رساندن ارزش خالص کل است. علاوه بر این، یک الگوریتم ممتیک موازی مبتنی بر تاگوچی کارآمد ساخته شده که شامل جست‌وجوی همسایگی تطبیقی موازی ترکیبی سفارشی است. رزم و همکاران [۳۲] یک مدل ریاضی چندهدفه برای طراحی مجدد شبکه جهانی انرژی زیستی پایدار ارائه کردند. این مدل همزمان اهداف اقتصادی، زیست‌محیطی و اجتماعی را در نظر گرفته و ضرایب زیست‌محیطی مدل با استفاده از نرم‌افزار سیماپرو محاسبه شده است. در واقع، اهداف مسئله پیشنهادی بیشینه کردن سود پس از کسر مالیات، بیشینه کردن اثرات اجتماعی (میزان شغل ایجادشده) و صرفه‌جویی در انتشار گازهای گلخانه‌ای است. مدل چندهدفه با روش اپسیلون محدودیت بهبودیافته حل شد و تصمیم‌گیرندگان از راه حل‌های به‌دست‌آمده پارتو مطلع شدند. داده‌های حاصل از مطالعه ایران و ارمنستان برای اعتبارسنجی مدل و از نرم‌افزار سیستم اطلاعات جغرافیایی با هدف مطالعه دقیق تر نقشه جغرافیایی هر کشور استفاده شد. حسنی و همکاران [۳۳] یک مدل بهینه‌سازی چندهدفه استوار را برای پیکربندی ساختار شبکه زنجیره تأمین جهانی تاب‌آور سبز تحت اختلال در صنعت تولید تجهیزات پزشکی ارائه دادند. مسائل اقتصادی و زیست‌محیطی در طراحی شبکه در نظر گرفته شده و استراتژی‌های تخفیف برای به دست آوردن یک شبکه زنجیره تأمین تاب‌آور استفاده شد. در این مسئله یک مدل بهینه‌سازی عدد صحیح مختلط غیرخطی چندهدفه پیشنهاد شده است. اهداف مسئله پیشنهادی شامل ۱) به حداکثر رساندن سود کل زنجیره تأمین جهانی ۲) به حداقل رساندن تمرکز تسهیلات در زنجیره تأمین جهانی و ۳) به حداقل رساندن میزان انتشار کربن دی اکسید مورد انتظار از حمل مواد است. برای حل مسئله پیشنهادی از الگوریتم ترکیبی فراابتکاری جدید متشکل از الگوریتم تکاملی مبتنی بر کارایی پارتو و الگوریتم جست‌وجوی بزرگ همسایگی منطبق است.

شکاف تحقیق

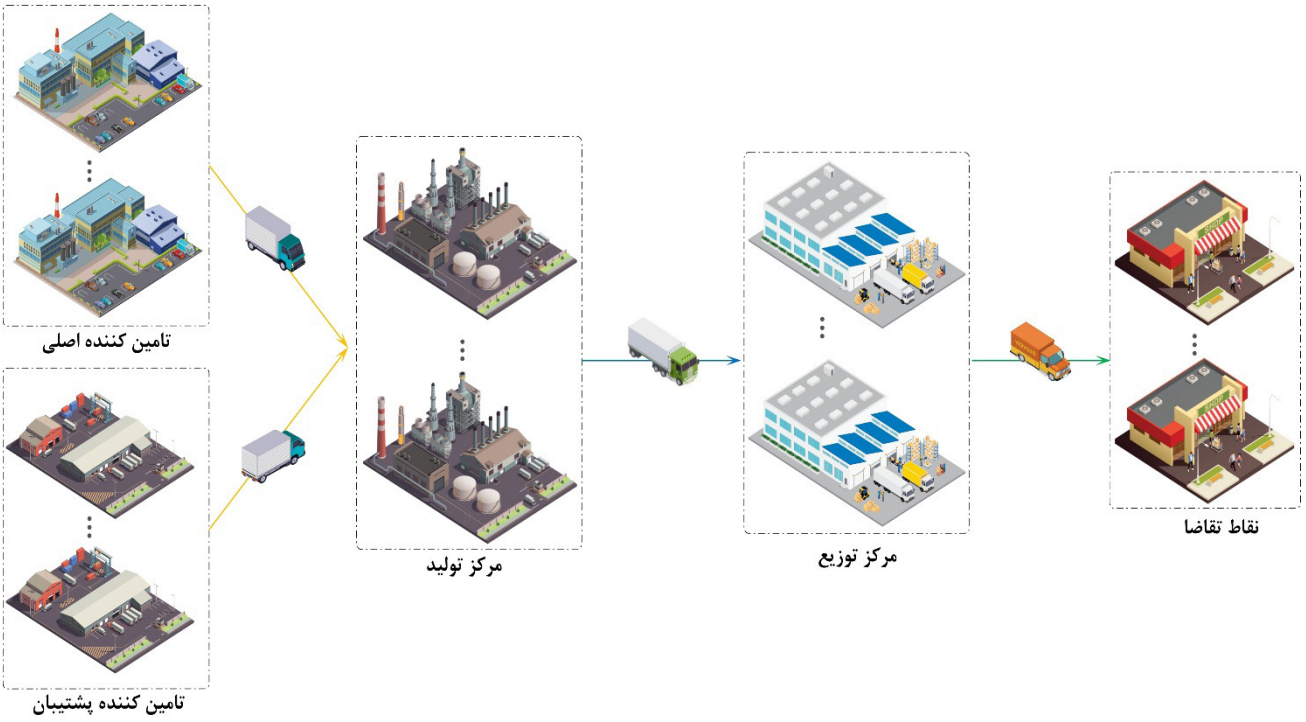
با توجه مرور ادبیات بیان‌شده مشاهده می‌شود که در سال‌های اخیر مقالات مختلفی در حوزه‌های مختلف زنجیره تأمین مانند زنجیره تأمین جهانی، زنجیره تأمین پایدار و زنجیره تأمین تاب‌آور مورد مطالعه قرار گرفته است. از طرفی در سال‌های اخیر طراحی شبکه زنجیره تأمین با درنظرگرفتن ویژگی‌های ترکیبی هم مانند جهانی-پایدار، پایدار-تاب‌آور و جهانی-تاب‌آور مد نظر محققان بوده است. بااینکه مطالعات فراوانی در این حوزه صورت پذیرفته، اما همچنان شکاف‌هایی هم در این زمینه وجود دارد. برای مثال تاکنون هیچ تحقیقی مسئله طراحی زنجیره تأمین جهانی پایدار و تاب‌آور تحت عدم قطعیت را به طور همزمان مورد بررسی قرار ندادده است. در حالی که با توجه به اهمیت فراوان این عناصر (پایداری، تاب‌آوری، جهانی بودن و عدم قطعیت) درنظرگرفتن همزمان آنها در مسئله می‌تواند کمک فراوانی به افزایش بهره‌وری شبکه زنجیره تأمین، کسب مزیت رقابتی و همچنین نزدیک‌تر شدن مسئله به دنیای واقعی بکند.

۳ تحقیقی که بیشترین شباهت را به مسئله حاضر دارند، تحقیق نیری [۱]، لطفی و همکاران [۲۹] و حسنی و همکاران [۳۳] هستند. در رابطه با تحقیق نیری و همکاران، تحقیق حاضر ویژگی‌های جهانی بودن و تاب‌آور بودن را به مسئله اضافه کرده و همچنین مسئله را تحت عدم قطعیت ترکیبی مورد بررسی قرار می‌دهد. در مقایسه با تحقیق لطفی و همکاران مزیت و تفاوت رساله حاضر علاوه بر درنظرگرفتن ویژگی جهانی بودن مطالعه مسئله تحقیق تحت عدم قطعیت ترکیبی است. همچنین در مقایسه با تحقیق حسنی و همکاران، تحقیق حاضر ویژگی پایداری و عدم قطعیت ترکیبی را به مسئله اضافه کرده است.

با توجه به نکات یادشده مشاهده می‌شود که در ادبیات تحقیق هرگز به مطالعه مسئله طراحی زنجیره تأمین جهانی، پایدار و تاب‌آور تحت عدم قطعیت ترکیبی پرداخته نشده است. از این‌رو به‌منظور پوشش این شکاف، این تحقیق یک مدل برنامه‌ریزی ریاضی چندهدفه به‌منظور طراحی شبکه زنجیره تأمین جهانی-پایدار-تاب‌آور ارائه کرده و سپس با استفاده از روش بهینه‌سازی استوار فازی تصادفی با عدم قطعیت ترکیبی مقابله می‌کند.

مسئله تحقیق

در این بخش به بیان مسئله تحقیق و ارائه مدل ریاضی پرداخته می‌شود. در این بخش به بیان و تشریح مسئله تحقیق پرداخته می‌شود. شبکه زنجیره تأمین طراحی‌شده در این تحقیق دارای ۵ تسهیل شامل تأمین‌کنندگان اصلی، تأمین‌کنندگان پشتیبان، مراکز تولید، مراکز توزیع و مشتریان است. جریان مواد در این شبکه بدین صورت است که ابتدا مواد اولیه مورد نیاز از تأمین‌کنندگان خریداری می‌شود. در این بخش باید دقت داشت که برخی از مواد اولیه نیازمند خرید از تأمین‌کنندگان بین‌المللی بوده و باید از تأمین‌کنندگان خارجی خریداری شوند. در مورد این مواد اولیه نرخ تبدیل ارز و تعرفه‌های گمرکی لحاظ خواهد شد. نکته دیگر هم وجود تأمین‌کنندگان پشتیبان است. در این مورد اگر یکی از تأمین‌کنندگان اصلی به هر دلیلی قادر به تأمین مواد اولیه مورد نیاز نبود، این مواد از تأمین‌کنندگان پشتیبان خریداری می‌شود. در ادامه محصول در مراکز تولید ساخته شده و به‌منظور ارسال به بازار مشتری به مراکز توزیع ارسال می‌شود. مراکز تولید قابلیت احداث با تکنولوژی‌های مختلفی را دارند که تکنولوژی با هزینه کمتر دارای آلایندگی بیشتری است. همچین امکان ایجاد ظرفیت مازاد (در صورت لزوم) در مراکز تولید وجود خواهد داشت. از سوی دیگر حالت‌های مختلفی برای حمل‌ونقل در نظر گرفته شده که هر حالت دارای هزینه، ظرفیت و آلایندگی خاص خود است. گفتنی است که کمبود هم مجاز بوده و سازمان ملزم به برآورد کردن تمامی تقاضای مشتریان نیست. از طرفی مسئله تحت سیاست انتشار کربن ظرفیت-تجارت مورد مطالعه قرار می‌گیرد. در این سیاست شرکت مجاز به انتشار میزان مشخصی کربن است که به آن اصطلاحاً ظرفیت انتشار گویند. در صورتی که شرکت کمتر از مقدار تعیین‌شده کربن تولید کرده باشد، می‌تواند ظرفیت مازاد خود را در بازار به فروش رسانده و درآمد کسب کند. از سوی دیگر، اگر شرکت نیاز به انتشار مقدار کربن بیشتر از میزان تعیین‌شده باشد، می‌تواند اعتبار کربن را از بازار خریداری کند. شبکه زنجیره تأمین پیشنهادی در شکل ۲ مشاهده می‌شود. در ادامه به بیان ویژگی‌های درنظرگرفته‌شده در مسئله برای لحاظ کردن پایداری، جهانی بودن و تاب‌آوری پرداخته می‌شود.



شکل ۲: شبکه زنجیره تأمین این تحقیق

به‌منظور لحاظ کردن فاکتورهای جهانی بودن در مسئله، نرخ تبدیل ارز و تعرفه‌های گمرکی در مسئله در نظر گرفته شده است.. به‌منظور لحاظ کردن پایداری در مسئله این تحقیق ۳ جنبه مالی، زیست‌محیطی و اجتماعی را در نظر گرفته است. بدین‌منظور تابع هدف اول مسئله هزینه‌های کل را کمینه می‌کند و تابع هدف دوم اثرات زیست‌محیطی را کمینه کرده و در تابع هدف سوم اثرات اجتماعی بیشینه می‌شود. تابع هدف چهارم هم به‌دنبال کمینه کردن عدم تاب‌آوری شبکه است. هزینه‌های مسئله شامل هزینه‌های مربوط به تأمین‌کنندگان، هزینه‌های تولید، هزینه‌های توزیع، هزینه‌های کمبود، هزینه‌های حمل‌ونقل و هزینه‌های مربوط به سیاست انتشار کربن است. اثرات زیست‌محیطی شامل کمینه کردن انتشار گازهای گلخانه‌ای حاصل از فرایندهای تولید و حمل‌ونقل مواد است. اثرات اجتماعی هم شامل اشتغال‌زایی و ایمنی کارگران است. در راستای لحاظ کردن تاب‌آوری در مسئله تحقیق استراتژی‌های زیر در نظر گرفته شده است:

۱) سناریوی اختلالات در مسئله دیده شده و اثر اختلالات بر ظرفیت تسهیلات و میزان تقاضا در نظر گرفته شده است [۲۲].

۲) تأمین‌کنندگان پشتیبان در مسئله تحقیق در نظر گرفته شده است [۲۸].

۳) کاهش پیچیدگی گره‌ها: پیچیدگی جریان منجر به کاهش تاب‌آوری شبکه می‌شود که با به حداقل رساندن تعداد کل لینک‌ها در شبکه زنجیره تأمین می‌توان آن را کاهش داد [۴].

۴) درنظرگرفتن حالت‌های مختلف حمل‌ونقل: درنظرگرفتن چند نوع حالت حمل‌ونقل به‌منظور افزایش انعطاف‌پذیری حمل‌ونقل [۳۷].

در ادامه، به معرفی عناصر مدل ریاضی پرداخته می‌شود.

اندیس‌ها

R	مجموعه مواد اولیه با شاخص r $(r = 1,\ldots,R)$
P	مجموعه محصولات با شاخص p $(p = 1,\ldots,P)$
I	مجموعه تأمین‌کنندگان اصلی با شاخص i $(i = 1,\ldots,I)$
I'	مجوعه تأمین‌کنندگان پشتیبان با شاخص i' $(i' = 1,\ldots,I')$
J	مجموعه مراکز تولید با شاخص j $(j = 1,\ldots,J)$
K	مجموعه مراکز توزیع با شاخص k $(k = 1,\ldots,K)$
D	مجموعه نقاط تقاضا با شاخص d $(d = 1,\ldots,D)$
C	مجموعه مراکز جمع‌آوری با شاخص c $(c = 1,\ldots,C)$
Q	مجموعه تکنولوژی تولید با شاخص q $(q = 1,\ldots,Q)$
L	مجموعه سطح ظرفیت برای تسهیلات با شاخص l $(l = 1,\ldots,L)$
M	مجموعه حالت‌های حمل‌ونقل با شاخص m $(m = 1,\ldots,M)$
T	مجموعه دوره‌ها با شاخص t $(t = 1,\ldots,T)$
N	مجموعه کشورهایی که تأمین‌کنندگان در آنها قرار گرفته‌اند با شاخص n $(n = 1,\ldots,N)$
S	مجموعه سناریوها با اندیس s $(s = 1,\ldots,S)$

اندیس‌ها

PSF_{in}	هزینه قرارداد با تأمین‌کننده اصلی i واقع در کشور n
$BSF_{i'n}$	هزینه قرارداد با تأمین‌کننده پشتیبان i' واقع در کشور n
MSF_{jql}	هزینه احداث مرکز تولید j با تکنولوژی q و سطح ظرفیت l
DFC_{kl}	هزینه احداث مرکز توزیع k با سطح ظرفیت l
RPS_{rint}	هزینه خرید ماده اولیه r از تأمین‌کننده اصلی i واقع در کشور n در دوره t
$RBS_{ri'nt}$	هزینه خرید ماده اولیه r از تأمین‌کننده پشتیبان i' واقع در کشور n در دوره t
EXR_n	نرخ تبدیل ارز برای تأمین‌کننده واقع در کشور n (برای تأمین‌کنندگان داخلی برابر با یک است)
CDR_n	۲۶ برای تأمین‌کننده واقع در کشور n (برای تأمین‌کنندگان داخلی برابر با صفر است)
MC_{pqjt}	هزینه تولید محصول p با تکنولوژی q در مرکز تولید j در دوره t
CD_{pkt}	هزینه‌های عملیاتی مرکز توزیع k برای محصول p در دوره t
BC_{pdt}	هزینه کمبود برای محصول p در نقطه تقاضا d در دوره t
HEC_{pjt}	هزینه ایجاد ظرفیت مازاد برای محصول p در مرکز تولید j در دوره t
TC_{pmt}	واحد هزینه حمل‌ونقل برای محصول p در هر کیلومتر برای حالت حمل‌ونقل m در دوره t
d_{ij}	مسافت بین تأمین‌کننده اصلی i و تولیدکننده j
$d_{i'j}$	مسافت بین تأمین‌کننده پشتیبان i' و تولیدکننده j
d_{jk}	مسافت بین تولیدکننده j و توزیع‌کننده k
d_{kd}	مسافت بین توزیع‌کننده k و نقطه تقاضا d
rr_{rp}	نرخ مصرف ماده اولیه r در محصول p
D_{pdts}	تقاضای محصول p در نقطه تقاضا d در دوره t در سناریو s
$CapS_{ir}$	ظرفیت تأمین‌کننده اصلی i برای تأمین ماده اولیه r
$SBCap_{i'r}$	ظرفیت تأمین‌کننده پشتیبان i' برای تأمین ماده اولیه r
$MCap_{pjlq}$	ظرفیت مرکز تولید j با تکنولوژی q با سطح ظرفیت l برای محصول p
$DCap_{pkl}$	ظرفیت مرکز توزیع k با سطح ظرفیت l برای محصول p
$TCap_m$	ظرفیت حمل‌ونقل حالت m
σ_{is}	درصدی از ظرفیت تأمین‌کننده i که در سناریو s مختل می‌شود
τ_{js}	درصدی از ظرفیت تولیدکننده j که در سناریو s مختل می‌شود
ρ_{ks}	درصدی از ظرفیت توزیع‌کننده k که در سناریو s مختل می‌شود
$EmCap_t$	حداکثر مقدار انتشار کربن مجاز در دوره t
cp	قیمت کربن در بازار

$M\tilde{e}l_q$	اثرات زیست‌محیطی تولید محصول با تکنولوژی q
$T\tilde{e}l_m$	اثرات زیست‌محیطی حمل‌ونقل محصول با حالت حمل‌ونقل m
JCM_{jlq}	تعداد شغل ایجادشده در صورت احداث مرکز تولید j با تکنولوژی q و سطح ظرفیت l
JCD_{kl}	تعداد شغل ایجادشده در صورت احداث مرکز توزیع k با سطح ظرفیت l
LDM_{jlq}	تعداد روزهای کاری ازدست‌رفته به دلیل آسیب دیدن کارگران در صورت احداث مرکز تولید j با تکنولوژی q و سطح ظرفیت l
LDD_{kl}	تعداد روزهای کاری ازدست‌رفته به دلیل آسیب دیدن کارگران در صورت احداث مرکز توزیع k با سطح ظرفیت l
$\Psi 1$	ضریب جریمه برای بحرانی بودن گره تولیدکننده
$\Psi 2$	ضریب جریمه برای بحرانی بودن گره توزیع‌کننده
$\Upsilon 1$	ضریب جریمه برای پیچیدگی گره تأمین‌کنندگان
$\Upsilon 2$	ضریب جریمه برای پیچیدگی گره تولیدکنندگان
$\Upsilon 3$	ضریب جریمه برای پیچیدگی گره توزیع‌کنندگان
PS_s	احتمال رخداد سناریو s
$BigM$	عدد مثبت بزرگ

متغیرهای تصمیم

YS_{in}	۱ اگر تأمین‌کننده اصلی i واقع در کشور n انتخاب شود: صفر در غیر این‌صورت
$YSB_{i'n}$	۱ اگر تأمین‌کننده پشتیبان i' واقع در کشور n انتخاب شود: صفر در غیر این‌صورت
YM_{jlq}	۱ اگر مرکز تولید j با سطح ظرفیت l و تکنولوژی q احداث شود: صفر در غیر این‌صورت
YD_{kl}	۱ اگر مرکز توزیع k با سطح ظرفیت l احداث شود: صفر در غیر این‌صورت
TM_{mij}	۱ اگر حالت حمل‌ونقل m بین تأمین‌کننده اصلی i و تولیدکننده j: صفر در غیر این‌صورت
$TM_{mi'j}$	۱ اگر حالت حمل‌ونقل m بین تأمین‌کننده پشتیبان i' و تولیدکننده j: صفر در غیر این‌صورت
TM_{mjk}	۱ اگر حالت حمل‌ونقل m بین تولیدکننده j و توزیع‌کننده k: صفر در غیر این‌صورت
TM_{mkd}	۱ اگر حالت حمل‌ونقل m بین توزیع‌کننده k و نقطه تقاضا d : صفر در غیر این‌صورت
$ASM_{rinjmts}$	مقدار ماده اولیه r که از تأمین‌کننده اصلی i واقع در کشور n به مرکز تولید j با حالت حمل‌ونقل m در دوره t در سناریو s ارسال می‌شود
$ASBM_{ri'njmts}$	مقدار ماده اولیه r که از تأمین‌کننده پشتیبان i' واقع در کشور n به مرکز تولید j با حالت حمل‌ونقل m در دوره t در سناریو s ارسال می‌شود
$AMD_{pjkqmts}$	مقدار محصول p تولیدشده با تکنولوژی q و ارسال‌شده از تولیدکننده j به توزیع‌کننده k با حالت حمل‌ونقل m در دوره t در سناریو s
ADD_{pkdmts}	مقدار محصول p ارسالی از مرکز توزیع k به بازار مشتری d در سناریو s
SH_{pdts}	مقدار کمبود محصول p در بازار مشتری d در دوره t در سناریو s
$ECAP_{pjts}$	مقدار ظرفیت مازاد ایجادشده برای محصول p در مرکز تولید j در دوره t در سناریو s
PC_{st}	مقدار اعتبار کربن خریداری‌شده در دوره t در سناریو s
SC_{st}	مقدار اعتبار کربن فروخته‌شده در دوره t در سناریو s

حال با توجه به موارد گفته‌شده مدل برنامه‌ریزی ریاضی چندهدفه برای مسئله تحقیق به‌صورت زیر فرموله می‌شود. در ابتدا توابع هدف مسئله ارائه می‌شود.

معادله (۱) تابع هدف اول مدل است که مقدار کل هزینه‌های شبکه زنجیره تأمین را کمینه می‌کند. در این راستا هزینه‌ها شامل هزینه ثابت کار با تأمین‌کننده، هزینه ثابت احداث مراکز تولید و توزیع، هزینه خرید مواد اولیه، هزینه‌های عملیاتی مراکز تولید و توزیع، هزینه‌های حمل‌ونقل و هزینه خرید اعتبار کربن است. گفتنی است که درآمد احتمالی حاصل از فروش اعتبار مازاد کربن هم از هزینه‌ها کسر شده است.

$$MinZ1 = \sum_{i,n} PSF_{in} \cdot EXR_n \cdot YS_{in} + \sum_{i',n} BSF_{i'n} \cdot YSB_{i'n} + \sum_{j,q,1} MSF_{jql} \cdot YM_{jlq} + \sum_{k,1} DFC_{kl} \cdot YD_{kl}$$
$$+ \sum_{s} PS_s \cdot \Big(\sum_{r,i,j,n,t} EXR_n \cdot \Big(\big(1 + CDR_n\big) \cdot RPS_{r\text{int}} + TC_{mt} \cdot d_{ij} \Big) \cdot ASM_{rinjmts}$$
$$+ \sum_{r,i',j,n,t} EXR_n \cdot \Big(\big(1 + CDR_n\big) \cdot RBS_{ri'\text{nt}} + TC_{mt} \cdot d_{i'j} \Big) \cdot ASBM_{ri'njmts}$$
$$+ \sum_{j,k,p,m,q,t} MC_{pjt} \cdot AMD_{pjkqmts} + \sum_{d,k,p,t,m} CD_{pkt} \cdot ADD_{pkdmts} + \sum_{d,p,t} BC_{pdt} \cdot SH_{pdts}$$
$$+ \sum_{j,p,t} HEC_{pjt} \cdot ECAP_{pjts} + TC_{mt} \cdot \Big(\sum_{p,j,k,m,t} d_{jk} \cdot AMD_{pjkqmts} + \sum_{k,d,p,m,t} d_{kd} \cdot ADD_{pkdmts} \Big)$$
$$+ CP \cdot PC_{st} - CP \cdot SC_{st} \Big)$$

(۱)

تابع هدف دوم (رابطه (۲)) به‌دنبال کمینه کردن اثرات زیست‌محیطی است. اثرات زیست‌محیطی شامل کربن تولیدشده در فرآیند تولید و حمل‌ونقل است.

$$MinZ2 = \sum_{s} PS_{s} \cdot \Big(\sum_{j,k,p,m,q,t} M\tilde{e}l_{q} \cdot AMD_{pjkqmts} + T\tilde{e}l_{m} \cdot \Big(\sum_{i,j,r,m,t} d_{ij} \cdot ASM_{rinjmts} + \sum_{i',j,r,m,t} d_{i'j} \cdot ASBM_{ri'njmts} + \sum_{p,j,k,m,t} d_{jk} \cdot AMD_{pjkqmts} \Big) \Big)$$

(۲)

معادله (۳) تابع هدف سوم است که به‌دنبال بیشینه‌سازی اثرات اجتماعی شبکه زنجیره تأمین است. بخش اول این تابع میزان اشتغال‌زایی را بیشینه و بخش دوم آن میزان آسیب‌های کارگران را کمینه می‌کند. گفتنی است که در این تابع W^{jc} نشان‌دهنده وزن فرصت‌های شغلی و W^{ld} نشان‌دهنده وزن ایمنی است.

$$MaxZ3 = W^{jc} \cdot \Big(\sum_{j,q,1} JCM_{jlq} \cdot YM_{jlq} + \sum_{k,1} JCD_{kl} \cdot YD_{kl} \Big) - W^{ld} \cdot \Big(\sum_{j,q,1} LDM_{jlq} \cdot YM_{jlq} + \sum_{k,1} LDD_{kl} \cdot YD_{kl} \Big)$$

(۳)

تابع هدف چهارم (رابطه (۴)) هم عدم تاب‌آوری شبکه زنجیره تأمین را کمینه می‌کند. در این تابع W^{ncr} بیان‌کننده وزن بحرانی بودن گره‌ها و W^{com} نشان‌دهنده وزن پیچیدگی گره‌ها هستند.

$$MinZ4 = W^{ncr} \cdot \Big(\sum_{j,q,1} \Psi 1 \cdot YM'_{jlq} + \sum_{k,1} \Psi 2 \cdot YD'_{kl} \Big) + W^{com} \cdot \Big(\sum_{i,n} \Upsilon 1 \cdot YS_{in} + \sum_{i',n} \Upsilon 1 \cdot YSB_{i'n} + \sum_{j,q,1} \Upsilon 2 \cdot YM_{jql} + \sum_{k,1} \Upsilon 3 \cdot YD_{kl} \Big)$$

(۴)

در ادامه به بیان محدودیت‌های مسئله پرداخته می‌شود. میزان مواد اولیه خریداری‌شده در هر دوره در محدودیت (۵) محاسبه می‌شود.

$$\sum_{i,m,n} ASM_{rinjmts} + \sum_{i',m,n} ASBM_{ri'njmts} = \sum_{k,m,p,q} rr_{rp} \cdot AMD_{pjkqmts} \qquad \forall s,j,r,t \qquad (۵)$$

محدودیت ظرفیت تأمین‌کنندگان اصلی و پشتیبان در روابط (۶) و (۷) نشان داده شده است.

$$\sum_{j,m} ASM_{rinjmts} \le (1-\sigma_{is}) \cdot CapS_{ir} \cdot YS_{in} \qquad \forall i,s,r,n,t \qquad (۶)$$

$$\sum_{j,m} ASBM_{ri'njmts} \le SBCap_{i'r} \cdot YSB_{i'n} \qquad \forall i',s,r,n,t \qquad (۷)$$

معادله (۸) مقدار محصول ارسالی از تولیدکننده به توزیع‌کننده را محاسبه می‌کند.

$$\sum_{j,m,q} AMD_{pjkqmts} = \sum_{d,m} ADD_{pkdmts} \qquad \forall s,k,p,t \qquad (۸)$$

میزان محصول ارسال‌شده به بازار مشتری از مرکز توزیع و همچنین مقدار کمبود محصول در رابطه (۹) محاسبه می‌شود.

$$\sum_{k,m} ADD_{pkdmts} + SH_{pdts} \ge D_{pdts} \qquad \forall s,p,d,t \qquad (۹)$$

روابط (۱۰)-(۱۲) محدودیت ظرفیت تولیدکننده و توزیع‌کننده را نشان می‌دهند.

$$\sum_{k,m,p} AMD_{pjkqmts} \le \sum_{l,q} (1-\tau_{js}) \cdot MCap_{pjlq} \cdot YM_{jlq} + ECAP_{pjts} \qquad \forall s,j,p,q,t \qquad (۱۰)$$

$$ECAP_{pjts} \le BigM \cdot \sum_{l,q} YM_{jlq} \qquad \forall p,s,j,t \qquad (۱۱)$$

$$\sum_{d,m} ADD_{pkdmts} \le \sum_{t} (1-\rho_{kz}) \cdot DCap_{pkl} \cdot YD_{kl} \qquad \forall s,k \qquad (۱۲)$$

رابطه (۱۳) نشان‌دهنده محدودیت مربوط به سیاست انتشار کربن ظرفیت-تجارت است.

$$\sum_{j,k,p,m,t,q} M\tilde{e}l_{q} \cdot AMD_{pjkqmts} + \sum_{m} T\tilde{e}l_{m} \cdot \Big(\sum_{i,j,r,t} d_{ij} \cdot ASM_{rijmts} + \sum_{i',j,r,t} d_{ij} \cdot ASBM_{ri'jmts} + \sum_{j,k,p,t,q} d_{jk} \cdot AMD_{pjkqmts} \Big) + SC_{st} \le EmCap_{t} + PC_{st} \qquad \forall s,t \qquad (۱۳)$$

روابط (۱۴) و (۱۵) نشان می‌دهند که هر تسهیل حداکثر با یک سطح ظرفیت (و تکنولوژی) می‌تواند احداث شود.

$$\sum_{l,q} YM_{jlq} \le 1 \qquad \forall j \qquad (۱۴)$$

$$\sum_{l} YD_{kl} \le 1 \qquad \forall k \qquad (۱۵)$$

محدودیت‌های (۱۶)-(۱۹) محدودیت‌های ظرفیت حمل‌ونقل بوده و محدودیت‌های (۲۰)-(۲۶) رابطه بین متغیرهای صفر و یک حمل‌ونقل و مکان‌یابی را نشان می‌دهند.

$$\sum_{r} ASM_{rijmts} \le TCap_m.TM_{mij} \qquad \forall m,s,i,j,t \qquad (۱۶)$$

$$\sum_{r} ASBM_{ri'jmts} \le TCap_m.TM_{mi'j} \qquad \forall m,s,i',j,t \qquad (17)$$

$$\sum_{p,q} AMD_{pjkqmts} \le TCap_m.TM_{mjk} \qquad \forall m,s,k,j,t \qquad (18)$$

$$\sum_{p} ADD_{pkdmts} \le TCap_m.TM_{mkd} \qquad \forall m,s,k,d,t \qquad (19)$$

$$TM_{mij} \le YS_{in} \qquad \forall m,j,t \qquad (20)$$

$$TM_{mij} \le \sum_{l,q} YM_{jlq} \qquad \forall m,j,t \qquad (21)$$

$$TM_{mi'j} \le YSB_{i'n} \qquad \forall m,j,i' \qquad (22)$$

$$TM_{mi'j} \le \sum_{l,q} YM_{jlq} \qquad \forall m,j,i' \qquad (23)$$

$$TM_{mjk} \le \sum_{l,q} YM_{jlq} \qquad \forall m,j,k \qquad (24)$$

$$TM_{mjk} \le \sum_{l} YD_{kl} \qquad \forall m,j,k \qquad (25)$$

$$TM_{mkd} \le \sum_{l} YD_{kl} \qquad \forall m,d,k \qquad (26)$$

محدودیت‌های (۲۷)-(۳۰) هم به‌منظور محاسبه کردن بحرانی بودن گره‌ها در مسئله لحاظ شده‌اند. روابط (۲۷) و (۲۸) نشان می‌دهند که اگر مجموع میزان ورودی و خروجی از گره تولید از یک حد مشخص بیشتر باشد، آن گره بحرانی است. محدودیت‌های (۲۹) و (۳۰) هم بیان می‌کنند که اگر مجموع میزان ورودی و خروجی از گره توزیع از یک حد مشخص بیشتر باشد آن گره بحرانی است.

$$\sum_{r,m,i} ASM_{rijmts} + \sum_{r,m,i'} ASBM_{ri'jmts} + \sum_{m,p,k} AMD_{pjkqmts} \le BigM.YM'_{jlq} + U1_j \qquad \forall j,s,l,c,q,t \qquad (۲۷)$$

$$\sum_{r,m,i} ASM_{rijmts} + \sum_{r,m,i'} ASBM_{ri'jmts} + \sum_{m,p,k} AMD_{pjkqmts} \ge U1_j.YM'_{jlq} \qquad \forall j,s,l,c,q,t \qquad (28)$$

$$\sum_{m,p,j} AMD_{pjkqmts} + \sum_{p,d,m} ADD_{pkdmts} \le BigM.YD'_{kl} + U2_j \qquad \forall k,s,l,t \qquad (29)$$

$$\sum_{m,p,j} AMD_{pjkqmts} + \sum_{p,d,m} ADD_{pkdmts} \le U2_k.YD'_{kl} \qquad \forall k,s,l,t \qquad (30)$$

در مدل پیشنهادی هم فرموله کردن این عناصر به‌صورت همزمان بخشی است که مختص این تحقیق است. برای مثال وجود فاکتورهای زنجیره تأمین جهانی (نرخ تبدیل ارز و تعرفه گمرکی) که در معادله تابع هدف اول (معادله (۱)) مورد استفاده قرار گرفته‌اند، وجود ابعاد پایداری در توابع هدف دوم و سوم (به ترتیب معادلات (۲) و (۳)) و همچنین وجود استراتژی‌های تاب‌آوری در تابع هدف چهارم (معادله (۴)) و محدودیت‌های (۵)، (۷) و (۳۰)-(۱۶) گنجانده شده‌اند. تاکنون مدل ریاضی با وجود همزمان روابط یادشده توسعه داده نشده بود که در تحقیق حاضر به آن پرداخته شد.

مدل‌سازی عدم قطعیت

بر اساس ادبیات تحقیق مسئله زنجیره تأمین دارای ۲ منبع اصلی عدم قطعیت است [۳۴]. مورد اول عدم قطعیت مربوط به نوسانات محیط کسب‌وکار است [۳۴]. این حالت مربوط به ماهیت مسئله زنجیره تأمین است که با توجه به تغییرات بازار پیش‌بینی دقیق بسیاری از پارامترها مانند تقاضا و هزینه‌های حمل‌ونقل کار آسانی نبوده و معمولاً پارامترهای مسئله دارای عدم قطعیت هستند. از سوی دیگر، منبع دیگر عدم قطعیت مرتبط با حوادث طبیعی (مانند زلزله و طوفان) و حوادث غیرطبیعی (مانند حملات تروریستی) است [۳۴]. این حالت عدم قطعیت ممکن است باعث به وجود آمدن اختلالات جدی در فعالیت‌های زنجیره تأمین شود و ضررهای فراوانی را به شبکه وارد کند. در این تحقیق مسئله تحت هدفم قطعیت ترکیبی بررسی شده و از رویکرد بهینه‌سازی استوار فازی تصادفی به‌منظور مقابله با عدم قطعیت ترکیبی استفاده و در ادامه به تشریح این روش پرداخته می‌شود. گفتنی است که ۲ مورد از مقاهیم اساسی موجود در این روش استواری بهینگی و استواری موجه بودن هستند. استواری بهینگی بدین معناست که با تغییر در مقدار پارامترهای تعریف‌شده، پاسخ به‌دست‌آمده همچنان بهینه باقی بماند [۳۴]. استواری موجه بودن هم بدان معناست که پاسخ به‌دست‌آمده با تغییر جزئی در مقدار پارامترها همچنان موجه(شدنی) باقی بماند [۳۴]. ابتدا مدل فشرده زیر را در نظر بگیرید:

$$MinZ = C.x + \sum_s p_s.f.y_s$$
$$Ax \le d$$
$$Ly_s \le h_s$$
$$x, y_s \ge 0$$

در مدل فوق متغیر تصمیم بوده و مقدار آن مستقل از سناریوهاست. از سوی دیگر متغیر تصمیم دیگر مسئله بوده و مقدار آن بر اساس سناریوهای مختلف تعیین می‌شود. نشان‌دهنده احتمال وقوع سناریوهاست. و ضرایب تابع هدف بوده و ، و ضرایب فنی مسئله هستند. گفتنی است که و پارامترهای فازی و پارامترهای فازی سناریو (عدم قطعیت ترکیبی) هستند. توجه کنید که پارامترهای فازی دارای توزیع فازی مثلثی با ۳ نقطه بحرانی (برای مثال) هستند. حال با توجه به نکات گفته‌شده مدل هم‌ارز استوار فازی تصادفی برای مدل (۳۱) به‌صورت مدل (۳۲) است [۳۴].

$$MinZ = \left[\frac{c^1+c^2+c^3}{3}\right].x + \sum_s p_s.\left[\frac{f^1+f^2+f^3}{3}\right].y_s$$
$$+\beta\sum_s p_s.\left[\left(\left[\frac{f^1+f^2+f^3}{3}\right].y_s - \sum_{s'} p_{s'}.\left[\frac{f^1+f^2+f^3}{3}\right].y_{s'}\right) + 2\theta_s\right] + \sum_s \delta.\varepsilon_s \qquad (۳۲)$$
$$Ax \le (2\alpha_1 - 1).d^1 + (2-2\alpha_1).d^2$$
$$Ly_s + \varepsilon_s \le (2-2\alpha_2).h_s^3 + (2\alpha_2 - 1).h_s^2$$
$$\left[\frac{f^1+f^2+f^3}{3}\right].y_s - \sum_s p_s.\left[\frac{f^1+f^2+f^3}{3}\right].y_s + \theta_s \ge 0$$

در مدل هم‌ارز استواری فازی تصادفی (مدل (۳۲)) بخش اول و دوم تابع بر اساس میانگین پارامتر غیرقطعی فرموله شده است. در بخش سوم میزان انحراف تابع هدف از مقدار مورد انتظار برای آن (امید ریاضی) کمینه می‌شود. در واقع این بخش همان استواری بهینگی است. بخش چهارم تابع هدف هم مربوط به جریمه استواری شدنی بودن(موجه بودن) است. اهمیت استواری بهینگی یا به عبارت دیگر ضریب جریمه برای انحراف تابع هدف است. اهمیت استواری بهینگی یا به عبارت دیگر ضریب جریمه برای انحراف تابع هدف است که پارامتر نشان‌دهنده جریمه واحد غیرموجه بودن برای محدودیت کنترل است و متغیر میزان تخطی (غیر موجه بودن) را نشان می‌دهد. پارامترهای و که مقادیری بین ۰٫۵ تا یک هستند، سطح برآورده شدن (ارضا شدن) محدودیت‌های دارای پارامترهای غیرقطعی را نشان می‌دهند. گفتنی است که از آنجا که ممکن است انحرافات منفی هم رخ دهد و مقدار قدر مطلق آنها باید در تابع هدف در نظر گرفته شود، و محدودیت سوم به اعمال مقدار مطلق انحرافات در تابع هدف کمک می‌کند.

روش حل

در این بخش روش حل مورد استفاده در این تحقیق به‌منظور حل کردن مدل چندهدفه ارائه‌شده معرفی می‌شود. یکی از روش‌های پرکاربرد جهت حل مدل‌های چندهدفه برنامه‌ریزی آرمانی است. برنامه‌ریزی آرمانی یکی از مهم ترین مدل های برنامه‌ریزی چندهدفه است. این روش در ابتدا توسط چارنز و کوپر [۳۵] معرفی شد. در این تحقیق از روش برنامه‌ریزی آرمانی چند گزینه‌های با تابع مطلوبیت [۳۶] جهت حل مدل ریاضی چندهدفه استفاده می‌کند. مهمترین علت استفاده از این‌روش و مزیت آن نسبت به سایر روش‌های برنامه‌ریزی آرمانی به شرح زیر است [۳۷]: الف) در این روش به جای یک نقطه یک بازه آرمانی در نظر گرفته می‌شود که به تصمیم‌گیرندگان اجازه می‌دهد تا چندین آرمان به‌صورت پیوسته برای مسئله تعریف کنند؛ ب) این روش ارجحیت تصمیم‌گیرندگان را در مسئله لحاظ می‌کند؛ (ج) این روش با توجه به نداشتن متغیر صفر و یک و همچنین استفاده از تابع مطلوبیت خطی پیچیدگی محاسباتی کمی دارد. روش مزبور به‌صورت زیر فرموله می‌شود.

$$Min \sum_k \left[\beta_k^d .(d_k^+ + d_k^-) + \beta_k^\xi .(\xi_k^-) \right]$$

$$St.$$

$$\lambda_k \le \frac{U_{k,\max} - y_k}{U_{k,\max} - U_{k,\min}} \qquad \forall k$$

$$f_k(X) + d_k^- - d_k^+ = y_k \qquad \forall k$$

$$\lambda_k + \xi_k^- = 1 \qquad \forall k \qquad (۳۳)$$

$$U_{k,\min} \le y_k \le U_{k,\max} \qquad \forall k$$

$$d_k^+, d_k^-, y_k, \lambda_k, \xi_k^- \ge 0 \qquad \forall k$$

در مدل یادشده وزن تابع هدف نسبت به انحرافات مثبت و منفی را نشان می‌دهد. و به ترتیب نشان‌دهنده انحرافات مثبت و منفی تابع هدف هستند. وزن عدم مطلوبیت (انحراف نرمالیزه‌شده از کران آرمانی) بوده و میزان مطلوبیت تابع هدف را نشان می‌دهد.

و هم بیانگر حد پایین و بالای آرمان برای تابع هدف هستند. در صورت لزوم به‌منظور نرمالیزه کردن تابع هدف مدل یادشده می‌توان از رابطه زیر استفاده کرد که در آن

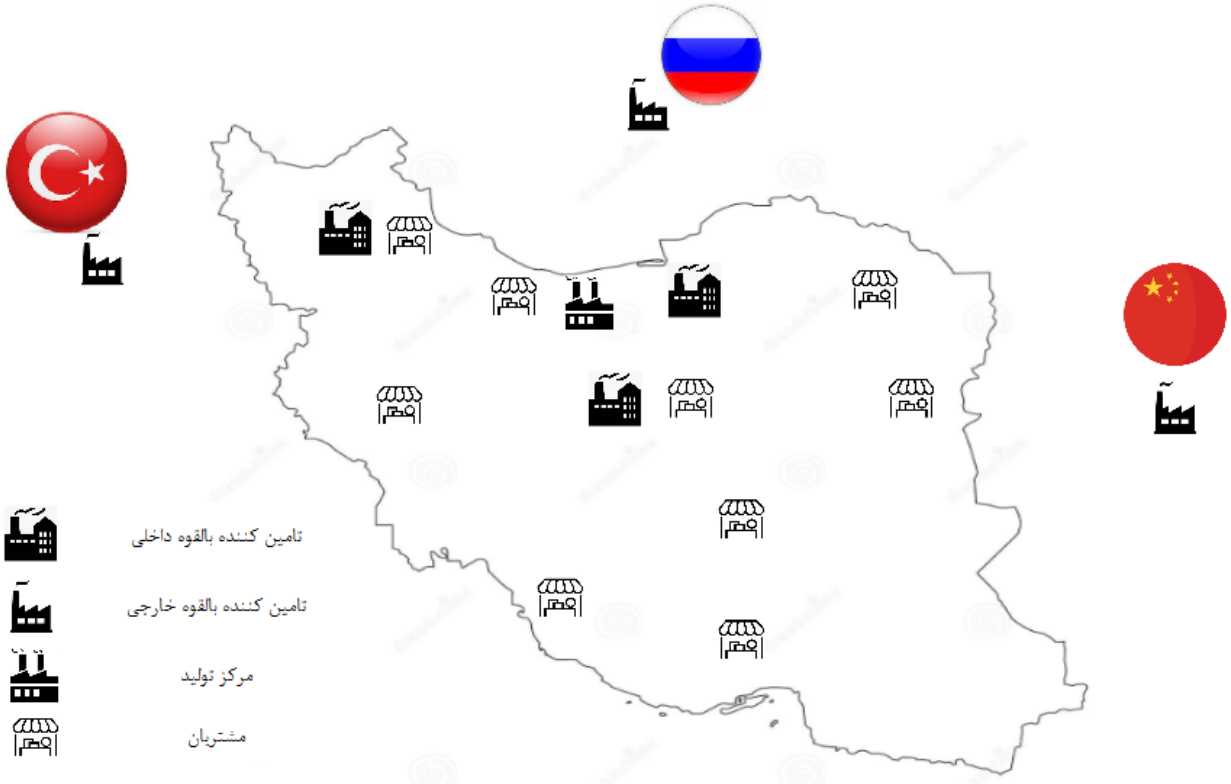
$$f_k^- = \{\max f_k(X)\} \quad و \quad f_k^+ = \{\min f_k(X)\}$$

$$Min \sum_k \left[\beta_k^d .(\frac{d_k^+ + d_k^-}{f_k^- - f_k^+}) + \beta_k^\xi .(\xi_k^-) \right] \qquad (۳۴)$$

نتایج محاسباتی

مطالعه موردی

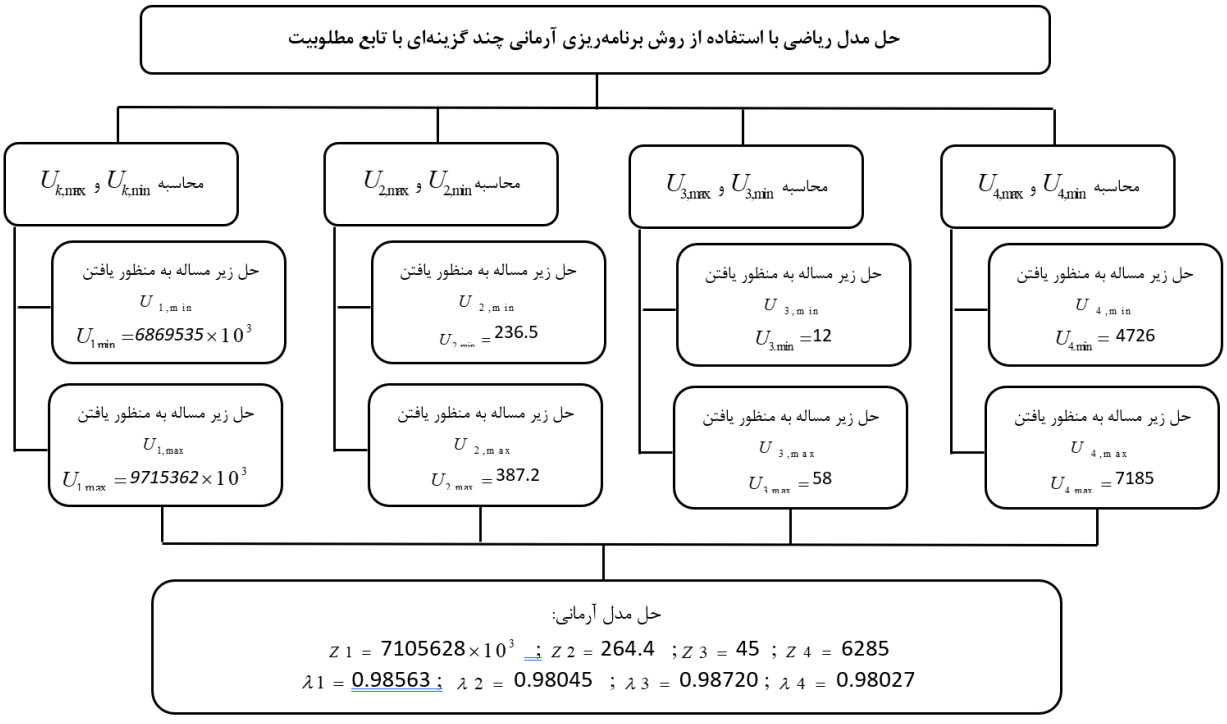
در این تحقیق به‌منظور نشان دادن کارایی و عملکرد مدل پیشنهادی یک مطالعه موردی واقعی بررسی شده است. در این راستا با توجه به اهمیت فراوان تجهیزات پزشکی به‌ویژه پس از بحران همه‌گیری کرونا این تحقیق یکی از مهمترین تجهیزات پزشکی در این برهه به نام دستگاه اکسیژن‌ساز را به عنوان مطالعه موردی انتخاب کرده است. دستگاه اکسیژن‌ساز یا همان تغلیظ‌کننده (غلیظ‌کننده) اکسیژن یکی از مهمترین و ضروری‌ترین وسایل پزشکی خانگی است که اکسیژن مورد نیاز بیماران را (بیمارانی که سطح اکسیژن خون پایینی دارند) با تغلیظ کردن هوای محیط به اکسیژن خالص به طور مستمر تأمین می‌کند. این تحقیق یک شرکت تولید تجهیزات پزشکی در شمال کشور را مطالعه کرده است. شرکت گفته‌شده برخی از قطعات مورد نیاز خود را از کشورهای چین، ترکیه و روسیه وارد می‌کند که در این رابطه مفهوم زنجیره تأمین جهانی برای آنها معنادار است. از سوی دیگر با توجه به قوانین، الزامات دولتی و بین‌المللی و همچنین در راستای افزایش وفاداری مشتریان این شرکت به دنبال پیاده‌سازی ابعاد پایداری در زنجیره تأمین خود است. از طرفی پس از بحران همه‌گیری کرونا شرکت نامبرده دچار چالش‌های فراوانی شده که جهت بهبود عملکرد خود به دنبال پیاده‌ساز استراتژی‌های تاب‌آوری در سازمان خود است. از این‌رو انگیزه‌ای کافی برای این تحقیق به‌منظور بررسی زنجیره تأمین این شرکت با درنظرگرفتن ابعاد جهانی پایداری و تاب‌آوری ایجاد شده است. شبکه کلی زنجیره تأمین این شرکت را در شکل ۳ مشاهده می‌کنید. با توجه به محدودیت تعداد صفحات خوانندگان جهت مطالعه داده‌های مربوط به مسئله می‌توانند به نویسنده ایمیل بزنند.



شکل ۳: شبکه زنجیره تأمین شرکت مطالعه موردی

گزارش نتایج

در این بخش به ارائه نتایج به‌دست‌آمده از حل مدل ریاضی با روش برنامه‌ریزی آرمانی چند گزینه‌ای با تابع مطلوبیت پرداخته می‌شود. برای حل مسئله ابعاد مدل به‌صورت ۸ تأمین‌کننده اصلی (۵ داخلی و ۳ خارجی)، ۳ تأمین‌کننده پشتیبان، ۳ مرکز بالقوه تولید، ۵ مرکز بالقوه توزیع و ۹ مشتری است. ۴ حالت حمل‌ونقل به شرح تراک‌ها(زمینی)، حمل‌ونقل دریایی، حمل‌ونقل هوایی و حمل‌ونقل ریلی در نظر گرفته شده است. ۲ نوع تکنولوژی تولید در نظر گرفته شده که یکی از آنها دارای هزینه بیشتر اما آلایندگی کمتر و دیگری دارای هزینه کمتر اما آلایندگی بیشتر است. شکل ۵ نشان‌دهنده مراحل حل و مقدار توابع هدف است. گفتنی است که با توجه به نظر کارشناسان وزن تابع هدف اول برابر ۰,۴ و سایر توابع هدف برابر با ۰,۲ در نظر گرفته شده است. شکل ۴ مراحل حل مسئله را نشان می‌دهد.



شکل ۴: نتایج حل مدل توسط روش برنامه‌ریزی آرمانی چند گزینه‌ای با تابع مطلوبیت

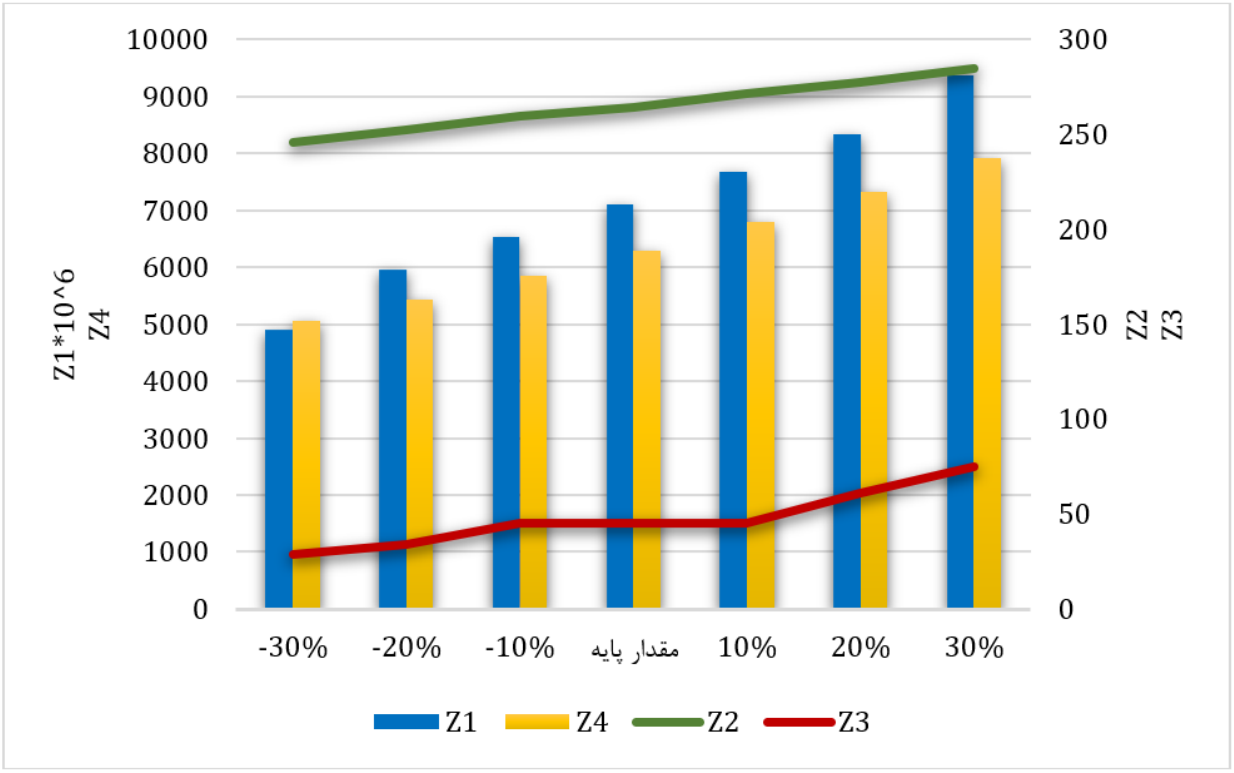
طبق نتایج به‌دست‌آمده تأمین‌کنندگان اصلی داخلی ۱، ۳ و ۵ و خارجی ۲ انتخاب شده و تأمین‌کننده پشتیبان ۲ هم برگزیده شده است. مرکز تولید ۱ با سطح ظرفیت ۲ و تکنولوژی ۱ و مرکز تولید ۳ با سطح ظرفیت ۱ و تکنولوژی ۲( ) احداث شده‌اند. از سوی دیگر، مراکز توزیع ۲ با سطح ظرفیت ۲، مرکز توزیع ۳ با سطح ظرفیت ۱ و مرکز توزیع ۵ با سطح ظرفیت ۲ احداث شده‌اند ($YD_{22} = YD_{31} = YD_{52} = 1$).

تحلیل حساسیت

این بخش به بررسی تأثیر پارامترهای کلیدی مدل بر مسئله تحقیق می‌پردازد. بدین‌منظور مسئله به ازای مقادیر مختلف برای پارامترها حل شده و نتایج تجزیه‌وتحلیل شدند.

تقاضا

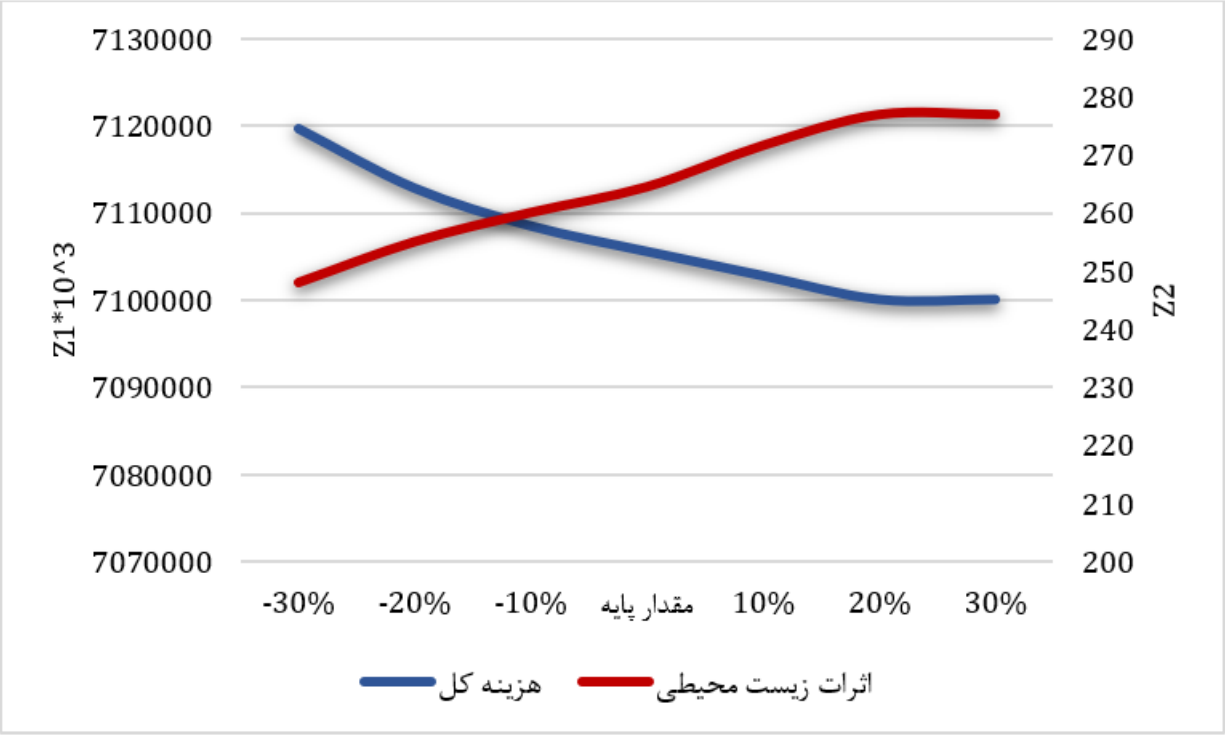
به‌منظور بررسی تأثیر پارامتر تقاضا بر مسئله تحقیق مسئله به ازای مقادیر مختلف این پارامتر حل و نتایج گزارش شده است. شکل ۵ نشان‌دهنده رفتار مسئله با توجه به تغییرات پارامتر تقاضاست. همان‌طور که در این شکل مشاهده می‌شود، افزایش تقاضا منجر به افزایش هزینه‌های سیستم، افزایش اثرات زیست‌محیطی، افزایش اثرات اجتماعی و افزایش جریمه غیرتاب‌آوری می‌شود. در این راستا زمانی که مقدار تقاضا ۳۰ درصد از مقدار پایه افزایش می‌یابد، توابع هدف اول، دوم، سوم و چهارم به ترتیب حدود ۳۳، ۸، ۶۰ و ۲۶ درصد افزایش می‌یابند. علت این رفتار سیستم را می‌توان به‌صورت زیر تحلیل کرد (۱) طبیعی است که بخشی از افزایش هزینه‌های سیستم با توجه به افزایش تقاضا به علت افزایش هزینه‌های عملیاتی (تولید، توزیع و حمل‌ونقل) است. اما بخش دیگری هم به علت هزینه‌های کمبود است؛ با توجه به این امر که با افزایش تقاضا احتمال برخورد به کمبود هم افزایش می‌یابد، (۲) با افزایش تقاضا میزان تولید و حمل‌ونقل هم افزایش یافته و در نتیجه میزان آلایندگی زیست‌محیطی (تابع هدف دوم) هم افزایش می‌یابد، (۳) افزایش تقاضا منجر به احداث تسهیلات بیشتری می‌شود که در نتیجه آن اثرات اجتماعی مانند اشتغال‌زایی هم افزایش می‌یابد و (۴) با افزایش تقاضا تعداد گره‌های بحرانی هم افزایش می‌یابد که این امر منجر به افزایش تابع هدف چهارم شده است.



شکل ۵: تحلیل حساسیت پارامتر تقاضا

ظرفیت انتشار کربن

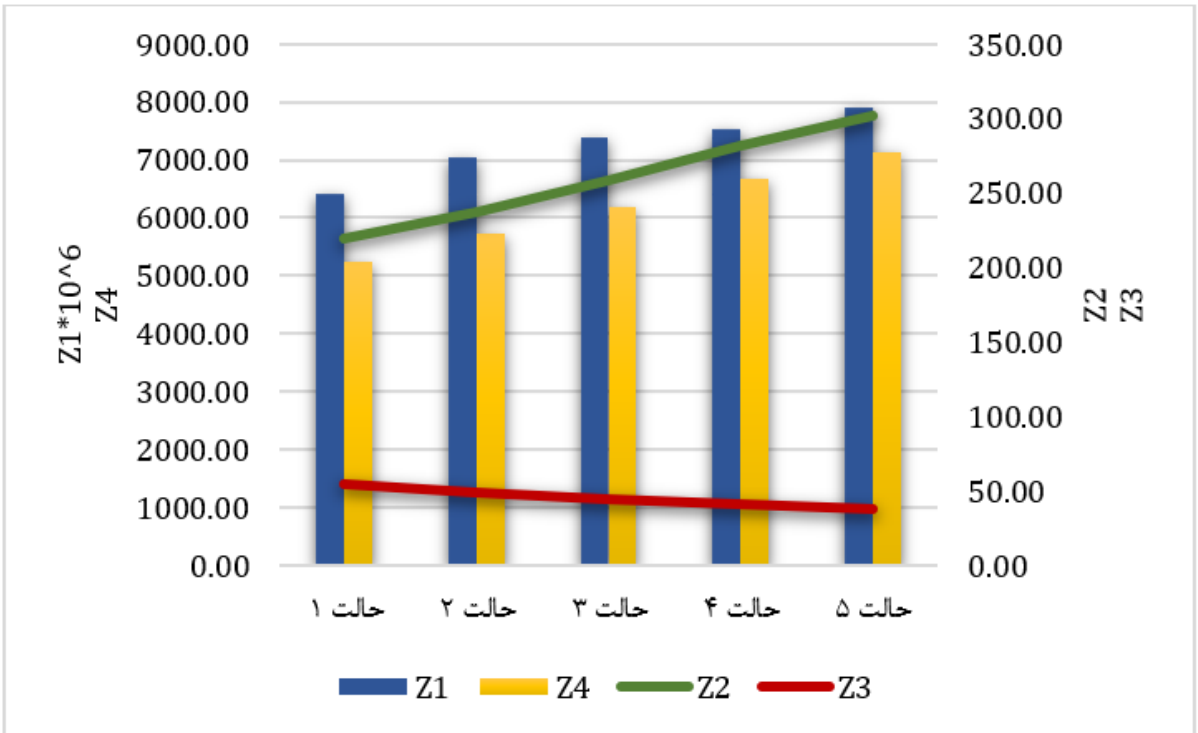
در این بخش به بررسی اثر ظرفیت انتشار کربن (سیاست انتشار کربن ظرفیت-تجارت) بر مسئله پرداخته می‌شود. شکل ۶ نشان‌دهنده نمودار تحلیل حساسیت پارامتر گفته شده است. همان‌طور که در این شکل مشاهده می‌شود، با افزایش ظرفیت انتشار کربن میزان هزینه‌ها کاهش یافته؛ اما میزان انتشار آلایندگی افزایش می‌یابد. البته باید دقت داشت که به ازای افزایش بیشتر از ۲۰ درصد از مقدار پایه میزان انتشار کربن و میزان هزینه‌ها ثابت شده‌اند. علت کاهش هزینه‌ها این امر است که با افزایش ظرفیت انتشار کربن شرکت هم دیگر نیازی به خرید اعتبار کربن برای فرآیندهای زنجیره تأمین خود ندارد و هم می‌تواند سهمیه مازاد خود را در بازار فروخته و کسب درآمد کند.



شکل ۶: تحلیل حساسیت پارامتر ظرفیت انتشار کربن

۳-۳-۶- نرخ اختلال

در این بخش تأثیر پارامتر نرخ اختلال در ظرفیت تسهیلات بر مسئله تحقیق بررسی می‌شود. بدین‌منظور مسئله در ۵ حالت مختلف حل می‌شود که هر چه از حالت ۱ به سمت حالت ۵ می‌رویم، درصد اختلال بیشتر می‌شود. شکل ۷ نشان‌دهنده نمودار تحلیل حساسیت پارامتر گفته شده است. همان‌طور که در شکل ۸ مشاهده می‌شود، افزایش پارامتر میزان نرخ اختلالات منجر به افزایش هزینه‌ها، افزایش اثرات زیست‌محیطی، کاهش اثرات اجتماعی و افزایش جریمه غیرتاب‌آوری سیستم می‌شود. در این راستا با حرکت از حالت ۱ به حالت ۵ تابع هدف اول حدود ۲۰ درصد افزایش، تابع هدف دوم حدود ۲۵ درصد افزایش، تابع هدف سوم حدود ۳۰ درصد کاهش و تابع هدف سوم حدود ۲۵ درصد افزایش داشته‌اند.



شکل ۷: تحلیل حساسیت پارامتر نرخ اختلال

وزن توابع هدف

در این بخش تحلیل حساسیت بر روی اوزان توابع هدف انجام می‌شود. بدین‌منظور مسئله در ۵ حالت مختلف حل شده و پاسخ‌ها گزارش شده است. جدول ۱ نشان‌دهنده رفتار مسئله با توجه به تغییر در مقدار وزن‌هاست. همان‌طور که در این جدول مشاهده می‌شود، با افزایش وزن هر یک از توابع هدف مقدار آن تابع به سمت مقدار ایده‌آل آن میل می‌کند. نکته دیگر این است که شباهت زیادی بین پاسخ مسئله در حالتی که وزن توابع هدف یکسان است (حالت ۵) و حالت پایه (حالت ۱) وجود دارد.

جدول ۱: تحلیل حساسیت اوزان توابع هدف

حالت	β_1	β_2	β_3	β_4	$Z1\times10^3$	$Z2$	$Z3$	$Z4$
۱	۰.۴	۰.۲	۰.۲	۰.۲	۷۱۰۵۶۲۸	۲۶۴.۴	۴۵	۶۲۸۵
۲	۰.۲	۰.۴	۰.۲	۰.۲	۷۱۰۹۷۵۳	۲۵۸.۶	۴۹	۶۰۳۸
۳	۰.۲	۰.۲	۰.۴	۰.۲	۷۱۱۰۰۲۸	۲۶۶.۵	۵۲	۶۴۵۱
۴	۰.۲	۰.۲	۰.۲	۰.۴	۷۱۰۹۹۲۶	۲۶۵.۸	۵۰	۵۷۰۶
۵	۰.۲۵	۰.۲۵	۰.۲۵	۰.۲۵	۷۱۰۷۳۹۵	۲۶۳.۱	۴۶	۶۱۰۲

بینش‌های تئوری

این پژوهش دارای چندین نکته تئوری است که در این بخش به برخی از آنها اشاره می‌شود. تحقیق حاضر به مطالعه مسئله طراحی شبکه زنجیره تأمین جهانی با درنظرگرفتن ویژگی‌های تاب‌آوری و پایداری پرداخته است. در این تحقیق یک مدل برنامه‌ریزی ریاضی چندهدفه ارائه شده که توابع هدف آن کمینه کردن هزینه‌ها، کمینه کردن اثرات زیست‌محیطی، بیشینه کردن اثرات اجتماعی و بیشینه کردن تاب‌آوری زنجیره تأمین است؛ به‌صورتی که عوامل جهانی‌سازی در آن در نظر گرفته شده باشد. سپس به‌منظور مقابله با عدم قطعیت ترکیبی از رویکرد بهینه‌سازی استوار فازی تصادفی استفاده شده و برای حل مسئله هم از روش برنامه‌ریزی آرمانی چند گزینه‌ای استفاده شده است. در این پژوهش به‌منظور لحاظ کردن ابعاد پایداری، در جنبه زیست‌محیطی میزان کربن انتشار یافته از فرآیند تولید و حمل‌ونقل محصول در نظر گرفته شده و در جنبه اجتماعی ۲ عامل مهم اشتغال‌زایی و ایمنی در نظر گرفته شده‌اند. از سوی دیگر، به‌منظور لحاظ کردن جهانی بودن ۲ فاکتور مهم نرخ تبدیل ارز و تعرفه‌های گمرکی در مسئله لحاظ شده است. همچنین جهت لحاظ کردن تاب‌آوری در مسئله از استراتژی‌های درنظرگرفتن سناریوی اختلالات، تأمین‌کنندگان پشتیبان، ایجاد ظرفیت مازاد، کاهش پیچیدگی گره‌ها و کاهش بحرانی بودن گره‌ها استفاده شده است. از طرفی تحقیق حاضر مسئله را تحت عدم قطعیت ترکیبی بررسی کرده؛ بدین صورت که پارامترهای غیرقطعی به ۳ دسته پارامترهای مبتنی بر سناریو، پارامترهای فازی و پارامترهای فازی-سناریو تقسیم شده‌اند. به‌صورت کلی مهمترین نکته تئوری در این تحقیق درنظرگرفتن ابعاد پایداری، جهانی بودن و تاب‌آوری به‌صورت همزمان در مسئله آن هم تحت عدم قطعیت و برای محصولی مهم در صنعت تجهیزات پزشکی است.

بینش‌های مدیریتی

در این بخش به ارائه برخی از مهمترین بینش‌های مدیریتی حاصل از این تحقیق پرداخته می‌شود. این پژوهش به بررسی مسئله طراحی شبکه زنجیره تأمین جهانی، پایدار و تاب‌آور تحت عدم قطعیت پرداخته است. بدین‌منظور یک مدل بهینه‌سازی استوار فازی تصادفی ارائه شده و با استفاده از رویکرد برنامه‌ریزی آرمانی چند گزینه‌ای با تابع مطلوبیت حل شده است. همچنین در این تحقیق با توجه به اهمیت تجهیزات پزشکی در بحران همه‌گیری کرونا، دستگاه اکسیژن‌ساز به عنوان مطالعه موردی انتخاب شده است. مهمترین بینش‌های مدیریتی این تحقیق را می‌توان به‌صورت زیر بیان کرد:

- تحقیق حاضر دید بسیار خوبی به مدیران زنجیره تأمین در راستای طراحی و یا بازطراحی شبکه زنجیره تأمین تحت نظر خود با درنظرگرفتن ویژگی‌های پایداری، تاب‌آوری و جهانی بودن می‌دهد. این پژوهش به مدیران کمک می‌کند تا چگونگی لحاظ کردن ویژگی‌های پایداری، تاب‌آوری و جهانی بودن در مسئله خود آشنا شوند و بتوانند ابعاد توسعه پایدار، استراتژی‌های تاب‌آوری و فاکتورهای جهانی بودن را در زنجیره تأمین خود پیاده‌سازی کنند. از سوی دیگر، تحقیق حاضر بینش کافی در رابطه با عدم قطعیت به عنوان یکی از چالش‌های اساسی در مسئله طراحی زنجیره تأمین را به مدیران می‌دهد تا به خوبی با تاثیر عدم قطعیت بر مسئله خویش را درک کنند.
- شکل ۵ نشان می‌دهد که با افزایش میزان تقاضا هزینه‌های کل هم افزایش می‌یابد. یکی از مهمترین دلایل این افزایش قیمت به علت افزایش هزینه‌های کمبود و همچنین حمل‌ونقل است. در این راستا به‌منظور کاهش هزینه‌های کمبود مدیران از استراتژی‌هایی مانند برون‌سپاری استفاده کنند. برون‌سپاری یا قرارداد بستن با پیمانکاران منجر به افزایش عرضه محصول، کاهش کمبود و در نتیجه کاهش هزینه‌های کمبود می‌شود. از سوی دیگر، با استرتژی‌هایی مانند لجستیک شخص ثالث می‌توان در شرایط حمل‌ونقل هم بهبود ایجاد کرد.

- شکل ۵ نشان می‌دهد که افزایش میزان تقاضا منجر به افزایش اثرات مخرب زیست‌محیطی هم می‌شود. در این راستا کاهش اثرات زیست‌محیطی از طریق استفاده از تسهیلات (تکنولوژی تولید و حالت حمل‌ونقل) با آلایندگی کمتر است. اگرچه معمولاً تسهیلات گفته‌شده دارای هزینه‌های بیشتری هستند که این امر انگیزه مدیران برای استفاده از آنها را کاهش می‌دهد. اما مدیران باید بدانند که با کاهش اثرات مخرب زیست‌محیطی شرکت خود چهره‌ای سبز از شرکت در انظار عمومی به نمایش می‌گذارند که این امر منجر به افزایش رضایت و افزایش وفاداری مشتریان می‌شود که در درازمدت افزایش سود شرکت را به همراه خواهد داشت.

- شکل ۶ اثر مثبت افزایش ظرفیت انتشار کربن بر کاهش هزینه‌های شرکت را نشان می‌دهد. از این‌رو افزایش قدرت چانه‌زنی مدیران به‌منظور اخذ ظرفیت انتشار کربن بیشتر از ارگان‌های مربوطه می‌تواند استراتژی مناسبی جهت کاهش هزینه‌های سیستم باشد.

- شکل ۷ اثر چشمگیر درصد ظرفیت مختل‌شده بر سیستم را نشان می‌دهد. از این‌رو مدیران باید توجه داشته باشند، لحاظ کردن استراتژی‌های تاب‌آوری و در کنار آنها مستحکم‌سازی تسهیلات شبکه زنجیره تأمین اگرچه ممکن است در نگاه اول هزینه اضافی دیده شود، اما در درازمدت و به‌ویژه در شرایط بحرانی می‌تواند به‌صورت چشمگیری از زیان‌دهی شرکت جلوگیری کند و منجر به کسب مزیت رقابتی شود.

نتیجه‌گیری و پیشنهادات آتی

تحقیق حاضر به مطالعه مسئله طراحی شبکه زنجیره تأمین جهانی با درنظرگرفتن ابعاد پایداری و تاب‌آوری پرداخته است. بدین‌منظور یک مدل برنامه‌ریزی ریاضی چندهدفه به‌منظور کمینه کردن هزینه‌های کل، کمینه کردن اثرات زیست‌محیطی، بیشینه کردن اثرات اجتماعی و کمینه کردن غیرتاب‌آور بودن سیستم ارائه شده است. سپس به‌منظور مقابله با عدم قطعیت مدل هم‌ارز استوار فازی تصادفی برای مسئله تحقیق توسعه داده شد. سپس به‌منظور حل مدل چندهدفه از روش برنامه‌ریزی آرمانی چند گزینه‌ای با تابع مطلوبیت استفاده شد. با توجه به اهمیت بالای تجهیزات پزشکی طی بحران همه‌گیری اخیر(ویروس کرونا) در این تحقیق دستگاه اکسیژن‌ساز به عنوان یکی از مهمترین تجهیزات پزشکی در زمان بحران همه‌گیری بیماری کرونا به عنوان مطالعه موردی انتخاب شد. در انتها هم تحلیل حساسیت بر روی پارامترهای کلیدی مسئله انجام شده و پیشنهادات مدیریتی ارائه شد. نتایج به‌دست‌آمده نشان داد که افزایش تقاضا اثر منفی بر میزان هزینه و میزان آلایندگی‌ها دارد. همچنین با توجه به نتایج به‌دست‌آمده با افزایش پارامتر ظرفیت انتشار کربن مقدار هزینه‌های سیستم کاهش یافته؛ اما مقدار آلایندگی‌ها افزایش می‌یابد. از سوی دیگر، با توجه به نتایج به‌دست‌آمده، افزایش پارامتر نرخ اختلال منجر به اثرات منفی در توابع هدف سیستم می‌شود. تحقیقات آتی می‌توانند به‌منظور حل مدل در ابعاد بزرگ الگوریتم‌های ابتکاری و یا فراابتکاری ارائه دهند. همچنین درنظرگرفتن مفاهیم دیگری مانند پاسخگویی و چابکی هم راهی دیگر برای گسترش تحقیق حاضر است.

منابع

[۱] Nayeri, S., Paydar, M. M., Asadi-Gangraj, E., & Emami, S. (۲۰۲۰). Multi-objective fuzzy robust optimization approach to sustainable closed-loop supply chain network design. Computers & Industrial Engineering, ,۱۴۸ ۱۰۶۷۱۶.

[۲] Garg, K., Kannan, D., Diabat, A., & Jha, P. C. (۲۰۱۵). A multi-criteria optimization approach to manage environmental issues in closed loop supply chain network design. Journal of Cleaner Production, ۳۱۴-۲۹۷ ,۱۰۰.

[۳] Sahebjamnia, N., Fathollahi-Fard, A. M., & Hajiaghaei-Keshteli, M. (۲۰۱۸). Sustainable tire closed-loop supply chain network design: Hybrid metaheuristic algorithms for large-scale networks. Journal of cleaner production, ۲۹۶-۲۷۳ ,۱۹۶.

[۴] Namdar, J., Torabi, S. A., Sahebjamnia, N., & Nilkanth Pradhan, N. (۲۰۲۱). Business continuity-inspired resilient supply chain network design. International Journal of Production Research, ۱۳۶۷-۱۳۳۱ ,(۵)۵۹.

[۵] Rezapour, S., Farahani, R. Z., & Pourakbar, M. (۲۰۱۷). Resilient supply chain network design under competition: a case study. European Journal of Operational Research, ۱۰۳۵-۱۰۱۷ ,(۳)۲۵۹.

[۶] Hasani, A., & Khosrojerdi, A. (۲۰۱۶). Robust global supply chain network design under disruption and uncertainty considering resilience strategies: A parallel memetic algorithm for a real-life case study. Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review, ۵۲-۲۰ ,۸۷.

[۷] Amin, S. H., & Baki, F. (۲۰۱۷). A facility location model for global closed-loop supply chain network design. Applied Mathematical Modelling, ۳۳۰-۳۱۶ ,۴۱.

[۸] Arntzen, B. C., Brown, G. G., Harrison, T. P., & Trafton, L. L. (۱۹۹۵). Global supply chain management at Digital Equipment Corporation. Interfaces, ۹۳-۶۹ ,(۱)۲۵.

[۱۲] Biuki, M., Kazemi, A., & Alinezhad, A. (۲۰۲۰). An integrated location-routing-inventory model for sustainable design of a perishable products supply chain network. Journal of Cleaner Production, ۱۲۰۸۴۲ ,۲۶۰.
[۱۳] Govindan, K., Mina, H., Esmaeili, A., & Gholami-Zanjani, S. M. (۲۰۲۰). An integrated hybrid approach for circular supplier selection and closed loop supply chain network design under uncertainty. Journal of Cleaner Production, ۱۱۸۳۱۷ ,۲۴۲.
[۱۴] Zhen, L., Huang, L., & Wang, W. (۲۰۱۹). Green and sustainable closed-loop supply chain network design under uncertainty. Journal of Cleaner Production, ۱۲۰۹-۱۱۹۵ ,۲۲۷.
[۱۵] Pishvaee, M. S., Razmi, J., & Torabi, S. A. (۲۰۱۴). An accelerated Benders decomposition algorithm for sustainable supply chain network design under uncertainty: A case study of medical needle and syringe supply chain. Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review, ۳۸-۱۴ ,۶۷.
[۱۶] Gholizadeh, H., Fazlollahtabar, H., Khalilzadeh, M., (۲۰۲۰). A robust fuzzy stochastic programming for sustainable procurement and logistics under hybrid uncertainty using big data. Journal of Cleaner Production. ۱۲۰۶۴۰.
[۱۷] Rahimi, M., Ghezavati, V., Asadi, F., (۲۰۱۹). A stochastic risk-averse sustainable supply chain network design problem with quantity discount considering multiple sources of uncertainty. Computers & Industrial Engineering.
[۱۸] Jouzdani, J., Govindan, K., (۲۰۲۰). On the sustainable perishable food supply chain network design: A dairy products case to achieve sustainable development goals. Journal of Cleaner Production. ۱۲۳۰۶۰ ,۲۷۸.
[۱۹] Goldbeck, N., Angeloudis, P., Ochieng, W., (۲۰۲۰). Optimal supply chain resilience with consideration of failure propagation and repair logistics. Transp. Res. Part E Logist. Transp. Rev. ۱۰۱۸۳۰ ,۱۳۳
[۲۰] Yavari, M., Zaker, H., (۲۰۱۹). An integrated two-layer network model for designing a resilient green-closed loop supply chain of perishable products under disruption. J. Clean. Prod. ۲۱۸–۱۹۸ ,۲۳۰.
[۲۱] Taleizadeh, A.A., Ghavamifar, A., Khosrojerdi, A., (۲۰۲۰). Resilient network design of two supply chains under price competition: game theoretic and decomposition algorithm approach. Oper. Res. ۳۳–۱.
[۲۲] Namdar, J., Torabi, S.A., Sahebjamnia, N., Nilkanth Pradhan, N., ۲۰۲۰. Business continuity-inspired resilient supply chain network design. Int. J. Prod. Res. ۳۷–۱.
[۲۳] Cardoso, S.R., Barbosa-Póvoa, A.P.F.D., Relvas, S., (۲۰۱۳). Design and planning of supply chains with integration of reverse logistics activities under demand uncertainty. Eur. J. Oper. Res. ۴۵۱–۴۳۶ ,۲۲۶.
[۲۴] Urata, T., Yamada, T., Itsubo, N., Inoue, M., (۲۰۱۷). Global supply chain network design and Asian analysis with material-based carbon emissions and tax. Comput. Ind. Eng. –۷۷۹ ,۱۱۳ ۷۹۲.
[۲۵] Mari, S. I., Lee, Y. H., & Memon, M. S. (۲۰۱۶). Sustainable and resilient garment supply chain network design with fuzzy multi-objectives under uncertainty. Sustainability (Switzerland), ۱۰)۸).
[۲۶] Souza, V. De, Bloemhof-Ruwaard, J., Borsato, M., (۲۰۱۹). Exploring ecosystem network analysis to balance resilience and performance in sustainable supply chain design. Int. J. Adv. Oper. Manag. ۴۵–۲۶ ,۱۱.
[۲۷] Zamanian, M.R., Sadeh, E., Amini Sabegh, Z., Ehtesham Rasi, R., (۲۰۲۰). A Multi-Objective Optimization Model for the Resilience and Sustainable Supply Chain: A Case Study. Int. J. Supply Oper. Manag. ۷۵–۵۱ ,۷.
[۲۸] Mehrjerdi, Y.Z., Shafiee, M., (۲۰۲۱). A resilient and sustainable closed-loop supply chain using multiple sourcing and information sharing strategies. J. Clean. Prod. ۱۲۵۱۴۱ ,۲۸۹.
[۲۹] Lotfi, R., Mehrjerdi, Y.Z., Pishvaee, M.S., Sadeghieh, A., Weber, G.-W., (۲۰۲۱). A robust optimization model for sustainable and resilient closed-loop supply chain network design considering conditional value at risk. Numer. Algebr. Control Optim. ۲۲۱ ,۱۱.
[۳۰] Bashiri, M., Tjahjono, B., Lazell, J., Ferreira, J., Perdana, T., (۲۰۲۱). The Dynamics of Sustainability Risks in the Global Coffee Supply Chain: A Case of Indonesia–UK. Sustainability ۵۸۹ ,۱۳.

programming model for the design of a reliable green closed-loop supply chain network. Hum. Ecol. Risk Assess. An Int. J. ۲۱۴۹–۲۱۱۹ ,۲۳.
[۳۵] Charnes, A., Cooper, W.W., (۱۹۷۷). Goal programming and multiple objective optimizations: Part ۱. Eur. J. Oper. Res. ۵۴–۳۹ ,۱.
[۳۶] Chang, C. Ter, (۲۰۱۱). Multi-choice goal programming with utility functions. Eur. J. Oper. Res. ۴۴۵–۴۳۹ ,۲۱۵. https://doi.org/۱۰,۱۰۱۶/j.ejor.۲۰۱۱,۰۶,۰۴۱
[۳۷] Sazvar, Z., Tafakkori, K., Oladzad, N., & Nayeri, S. (۲۰۲۱). A capacity planning approach for sustainable-resilient supply chain network design under uncertainty: A case study of vaccine supply chain. Computers & Industrial Engineering, ۱۰۷۴۰۶ ,۱۵۹.
[۳۱] Hasani, A., Khosrojerdi, A., (۲۰۱۶). Robust global supply chain network design under disruption and uncertainty considering resilience strategies: A parallel memetic algorithm for a real-life case study. Transp. Res. Part E Logist. Transp. Rev. ۵۲–۲۰ ,۸۷
[۳۲] Razm, S., Nickel, S., Sahebi, H., (۲۰۱۹). A multi-objective mathematical model to redesign of global sustainable bioenergy supply network. Comput. Chem. Eng. ۲۰–۱ ,۱۲۸.
[۳۳] Hasani, A., Mokhtari, H., Fattahi, M., ۲۰۲۱. A multi-objective optimization approach for green and resilient supply chain network design: a real-life Case Study. J. Clean. Prod. ۱۲۳۱۹۹ ,۲۷۸.
[۳۴] Fazli-Khalaf, M., Mirzazadeh, A., Pishvaee, M.S., ۲۰۱۷. A robust fuzzy stochastic