



طراحی شبکه زنجیره تأمین حلقه بسته با رویکرد پایداری و قابلیت اطمینان

سجاد امیریان^{۱*}، مقصود امیری^۲، محمدتقی تقوی فرد^۳

^۱ دانش آموخته دکتری گروه مدیریت صنعتی، دانشکده مدیریت و حسابداری، دانشگاه علامه طباطبائی، تهران، ایران

^۲ استاد گروه مدیریت صنعتی، دانشکده مدیریت و حسابداری، دانشگاه علامه طباطبائی، تهران، ایران

^۳ استاد گروه مدیریت صنعتی، دانشکده مدیریت و حسابداری، دانشگاه علامه طباطبائی، تهران، ایران

* ایمیل نویسنده مسئول: sajad_amirian@atu.ac.ir

واژگان کلیدی: چکیده

پایداری، قابلیت اطمینان، محیط رقابتی عصر حاضر، توجه سازمان‌ها را به رعایت الزامات کیفیت و مسئولیت‌پذیری اجتماعی بهینه‌سازی چند هدفه، روش AEC، شبکه زنجیره تأمین حلقه بسته

مسئله طراحی شبکه زنجیره تأمین اقتصادی، مسئولیت‌پذیر و قابل اطمینان را به صورت جامع و کارآمد مورد مدل‌سازی قرار داده است. از این رو، یک مدل برنامه‌ریزی عدد صحیح مختلط غیرخطی برای مسئله طراحی شبکه زنجیره تأمین به صورت سه هدفه، چندمحصولی، چندسطحی، چندمنبعی، چندطرفیتی و چندمرحله‌ای در نظر گرفته شده است. جواب‌های بهینه پارتو مدل پیشنهادی، با استفاده از روش محدودیت اسپیلون تکامل یافته (AEC) به دست آمده است. همچنین از مثال عددی با داده‌های تصادفی برای سنجش صحت و عملکرد کلی مدل پیشنهادی استفاده شده است. نتایج نشان داد که با افزایش پارامتر تقاضا مقدار سود مسئله افزایش می‌یابد. این در حالی است که قابلیت اطمینان و مسئولیت‌پذیری اجتماعی کاهش پیدا می‌کند. علاوه بر این، با افزایش انتشار گازهای گلخانه‌ای مقدار تابع هدف سود و مسئولیت‌پذیری اجتماعی کاهش پیدا می‌کنند در حالی که مقدار تابع هدف قابلیت اطمینان تقریباً ثابت می‌ماند. با این حال، دستیابی به هم‌افزایی میان پایداری و قابلیت اطمینان در طراحی شبکه زنجیره تأمین، نیازمند تدوین دستورالعمل‌های دقیق‌تر و بلندمدت‌تری است

تاریخ دریافت:

۱۱ اردیبهشت ۱۴۰۲

تاریخ پذیرش:

۲۴ تیر ۱۴۰۲



مقدمه

۱-۱. بیان مسئله و ضرورت تحقیق

زنجیره تأمین مجموعه‌ای از زیرساخت‌هاست که کلیه فعالیت‌ها از مرحله تهیه مواد اولیه تا مرحله تحویل کالای نهایی به مصرف‌کننده را شامل شده و از طریق عرضه محصولات نهایی و خدمات به مشتریان، تولید ارزش می‌نماید. هدف زنجیره تأمین، به حداکثر رساندن ارزش کلی افزوده شده به محصولات از طریق شبکه فرآیندهای داخلی و ارتباط با تأمین‌کنندگان و مشتریان است. در این راستا، محصولات باید در مقادیر مورد نیاز، با کیفیت مشخص، با هزینه رقابتی و به موقع عرضه شوند (چوپرا و میندل ۱، ۲۰۰۷). مدیریت زنجیره تأمین، وظیفه یکپارچه‌سازی واحدهای سازمانی در طول زنجیره تأمین و هماهنگ‌سازی جریان‌های مواد، اطلاعات و مالی را بر عهده دارد. مدیریت و کنترل هماهنگ فعالیت‌ها در زنجیره تأمین، می‌تواند محصولات و خدمات با کیفیت و قابل اطمینان را به سرعت و با حداقل هزینه در اختیار مشتریان قرار دهد. طراحی شبکه زنجیره تأمین، یک دانش میان رشته‌ای است که در علوم مانند مدیریت، استراتژیک، تدارکات و تحقیق در عملیات ریشه دارد. طراحی شبکه زنجیره تأمین، یک تصمیم راهبردی است که به پیکربندی زنجیره تأمین اشاره دارد و به عنوان یک مسئله‌ی زیرساختاری مدیریت زنجیره تأمین، اثرات دیرپایی روی سایر تصمیم‌های تاکتیکی و عملیاتی دارد (گوویندان ۲ و همکاران، ۲۰۱۷). بیشترین هزینه عملیاتی سازمان‌ها که معمولاً محسوس نیست، مربوط به تصمیم‌گیری اشتباه در زمینه‌ی طراحی و استقرار تسهیلات می‌باشد.

شبکه‌های مستقیم و معکوس، دو دسته کلی زنجیره تأمین می‌باشند که به دلیل ارتباط با یکدیگر در بعضی از قسمت‌ها (به عنوان مثال مواد بازیافتی ممکن است دوباره وارد زنجیره رو به جلو شوند)، عملکردشان وابسته به هم می‌باشد. زنجیره تأمین رو به جلو، جریان مواد اولیه، موجودی در حال ساخت و محصولات نهایی و اطلاعات مربوط به آن‌ها را از طرف عرضه تا طرف تقاضا مدیریت می‌کند. این در حالی است که زنجیره تأمین رو به عقب فرآیند برنامه‌ریزی، پیاده‌سازی، و کنترل کارآمد با هزینه‌ی مؤثر جریان محصولات مصرف شده از نقطه‌ی مصرف به نقطه‌ی مبدأ با هدف بازیابی ارزش یا دفع مناسب را در بر می‌گیرد. ادغام جریان‌های رو به جلو و معکوس با هدف سودآوری و بازآفرینی ارزش محصولات برگشتی، زنجیره تأمین حلقه بسته ۳ را به ادبیات معرفی کرده است که از زیربهدینگی‌های ناشی از طراحی جداگانه این دو شبکه نیز جلوگیری می‌کند (نارجانی ۴ و همکاران، ۲۰۱۷). زنجیره تأمین حلقه بسته، دستیابی به تولید پایدار (به معنی حفاظت از منابع و سازگاری با محیط زیست) را تسهیل می‌کند و شهرت آن به عنوان زنجیره تأمین دوست‌دار محیط زیست ۵ نیز احتمالاً به دلیل همین کارکرد می‌باشد. طبق گفته پاگل و وو ۶ (۲۰۰۹) یک زنجیره تأمین واقعاً پایدار علاوه بر تکمیل بعد اقتصادی، به محیط زیست و جامعه (ابعاد غیر اقتصادی) آسیب نمی‌رساند. حوزه طراحی شبکه زنجیره تأمین حلقه بسته در ادغام با پارادایم پایداری، مطالعات مختلفی در ادبیات را به خود اختصاص داده است. با این وجود، اکثر آن‌ها تنها یک یا دو جنبه از پایداری را در نظر می‌گیرند و معمولاً جنبه اجتماعی را نادیده می‌گیرند (امیریان و همکاران، ۲۰۲۲a). این در حالی است که فرآیند تصمیم‌گیری در طراحی شبکه زنجیره تأمین برای برآوردن الزامات ذینفعان و افزایش سودآوری، انعطاف‌پذیری و مزیت رقابتی سازمان‌ها، نیاز به یک برنامه متعادل دارد که سه جنبه پایداری را در نظر بگیرد (آهی و سرسی ۷، ۲۰۱۵). در واقع، مدیریت ناکارآمد پایداری اجتماعی می‌تواند بر فعالیت‌های اجتماعی تأثیر منفی بگذارد و مشکلات متعددی از جمله

1 Chopra & Meindl

2 Govindan

3 Closed-Loop

4 Nurjanni

5 Environmentally-friendly

6 Pagell & Wu

7 Ahi & Searcy



افزایش طرد اجتماعی و نابرابری‌ها و از بین بردن انسجام اجتماعی ایجاد کند. بنابراین، مفهوم پایداری اجتماعی به ویژگی جذاب‌تری در مدیریت زنجیره تأمین تبدیل می‌شود (خان و همکاران، ۲۰۲۱).

یکی از مهمترین عناصر کیفی کسب و کارها پرهیز از انقطاع تولید و اختلال خدمت مانند تحویل ناقص و با تأخیر کالا/خدمت است. قابلیت اطمینان، گسترش کیفیت در حوزه زمان است و به عنوان احتمال عدم خرابی یا شکست در طول یک بازه زمانی معین تفسیر می‌شود (اسمیت ۲، ۲۰۲۱). یک زنجیره تأمین در صورتی قابل اطمینان است که با وجود از کارافتادگی بخش‌هایی از زنجیره، عملکرد خوبی داشته باشد (میاثو ۳ همکاران، ۲۰۰۹). قابلیت اطمینان اعضای زنجیره تأمین به عنوان عملکرد طبیعی تسهیلات در یک دوره زمانی مشخص با ظرفیت معین تعریف می‌شود (اسکلرات ۴ و همکاران، ۲۰۱۵). با این حال، بر اساس ماهیت و تنوع تجهیزات، انواع مختلفی از خرابی‌ها در زنجیره تأمین ممکن است وجود داشته باشد. قابلیت اطمینان تسهیلات و تاب‌آوری در مقابل شرایط اختلال از جمله پیشرفت‌های اخیر است که توسط محققان به زنجیره تأمین اضافه شده است (سینگ ۵ و همکاران، ۲۰۲۱). تحویل کامل و سالم محصولات به مشتریان در زنجیره تأمین، مستلزم عملکرد بدون خرابی تسهیلات، مسیرهای ارتباطی و وسایل نقلیه به عنوان اجزای شبکه زنجیره تأمین است. شفی ۶ (۲۰۰۷) تأکید می‌کند که مدل‌سازی رویدادهای شدید در طراحی شبکه زنجیره تأمین به دلیل انواع فاجعه‌های متعدد و تأثیرات مخربی که بر منابع شبکه می‌گذارند، یک مسئله چالش برانگیز است. تأثیرات منفی اختلالاتی نظیر اشتباهات انسانی (فاجعه هپارین ۷)، رویدادهای طبیعی (زلزله ترکیه) و بیماری‌های همه‌گیر (کووید-۱۹) بر زنجیره‌های تأمین پایدار، بزرگ‌تر و سریع‌تر است (گوویندان ۹ و همکاران، ۲۰۲۰). اگر سیستمی نتواند از اختلالات رهایی یابد، قاعدتاً نمی‌تواند کیفیت اولیه خود را بازیابی کند و بنابراین در دستیابی به اهداف خود - اقتصادی، زیست محیطی، و اجتماعی - نیز ناتوان است (امیریان و همکاران، ۱۴۰۲). بنابراین، طراحان زنجیره تأمین نیاز به طراحی یک شبکه زنجیره تأمین حلقه بسته پایدار و قابل اطمینان دارند تا توجه بیشتری به قابلیت اطمینان، انعطاف‌پذیری و ریسک داشته باشند (اسمی‌زاده و ملت‌پرست، ۲۰۲۱).

به طور سنتی، بهینه‌سازی اقتصادی (سودآوری بیشتر یا هزینه کمتر) در طراحی شبکه زنجیره تأمین، مزیت رقابتی محسوب می‌شد. اخیراً، توانایی تداوم زنجیره تأمین به عنوان یکی از پارادایم‌های جدید در طراحی شبکه زنجیره تأمین اهمیت بیشتری یافته است. از این رو، توجه همزمان به جوانب پایداری و قابلیت اطمینان در مسئله طراحی شبکه زنجیره تأمین، می‌تواند علاوه بر کسب مزیت رقابتی بلندمدت، توانایی تداوم زنجیره تأمین را نیز در پی داشته باشد. در این راستا، هدف تحقیق حاضر طراحی شبکه زنجیره تأمین حلقه بسته می‌باشد که قابل اعتماد و ارزان بوده و ضمن تأکید بر مسئولیت‌پذیری اجتماعی، رضایت مشتری را نیز جلب نماید. زنجیره‌های تأمین با استفاده از این مدل می‌توانند در سطوح استراتژیکی (تعیین مکان‌های تولید، توزیع، جمع‌آوری و بازیافت) و تاکتیکی (میزان جریان مواد و محصولات در شبکه) برای دستیابی به سودآوری، مسئولیت‌پذیری اجتماعی و قابلیت اطمینان بیشتر، تصمیم‌گیری نمایند.

۲-۱. چارچوب نظری و پیشینه تحقیق

- 1 Khan
- 2 Smith
- 3 Miao
- 4 Athikulrat
- 5 Singh
- 6 Sheffi
- 7 Heparin
- 8 COVID-19 Pandemic
- 9 Govindan



یک زنجیره تأمین حلقه بسته، با افزایش قابلیت اطمینان محصولات یا قطعات برگشتی به ظرفیت کمتری برای بازرسی، بازسازی و جداسازی نیاز دارد (ساموئل ۱ و همکاران، ۲۰۲۱). کمال احمدی و ملت پرست (۲۰۱۶) به شرکت‌هایی که نسبت به مدیریت ریسک در انتخاب و تخصیص تأمین‌کننده بی‌توجه‌اند، توصیه می‌کنند که از تأمین‌کنندگان کمتر و قابل اطمینان‌تر خرید کنند. به تازگی نتایج مطالعه آنجلس ۲ و همکاران (۲۰۲۲) نشان داد که شرایط جاده و قابلیت اطمینان تجهیزات، عوامل اصلی تأثیرگذار بر مصرف سوخت هستند. به عنوان مثال، بهبود قابلیت اطمینان کامیون به میزان ۱۰٪، انتشار گازهای گلخانه‌ای را به میزان ۶٪ کاهش می‌دهد و بهبود جاده‌ها از شرایط بد به شرایط خوب به کاهش ۲۳٪ در انتشار گازهای گلخانه‌ای کامیون‌های معدن کمک می‌کند. فاصله و پراکندگی بین اعضاء در زنجیره تأمین ریسک‌های قطع جریان‌ها را بواسطه‌ی مسافت‌های حمل و نقل طولانی افزایش می‌دهد (جیانپرو و التنتوی ۱، ۲۰۰۴). در مسیرهای با مسافت بیشتر، سوخت زیادتری مصرف می‌شود. بنابراین، انتشار دی اکسید کربن نیز بیشتر می‌شود (باروس ۲ و همکاران، ۲۰۱۹). در صحبت از جامعه هدف، می‌توان اذعان نمود که پارادایم قابلیت اطمینان به دنبال بازاری است که مشتریان خواهان محصولی با قیمت پایین اما با کیفیت بالا هستند. به طور خاص، اگر کیفیت با قابلیت اطمینان محصول همراه باشد، هزینه خدمات در سطح کیفیت کاهش می‌یابد (وانگ ۳ و همکاران، ۲۰۲۲). در حالی که پارادایم پایداری در پی دستیابی به مشتریانی است که تفکرات زیست محیطی و اجتماعی یکسانی دارند و محصولات شرکت‌هایی را خریداری می‌کنند که با محیط زیست سازگار و نسبت به جامعه مسئولیت‌پذیر باشد (امیریان و همکاران، ۲۰۲۲b). یک نمای کلی برای مقایسه هر دو رویکرد پایداری و قابلیت اطمینان در جدول ۱ ارائه شده است.

جدول ۱. مقایسه رویکردهای پایداری و قابلیت اطمینان

ویژگی	پایداری	قابلیت اطمینان
انتخاب تأمین‌کننده	در مورد انتخاب تأمین‌کننده پایدار، اوکو و تارتیبو ۷ (۲۰۲۰) عوامل اقتصادی، زیست محیطی و اجتماعی را برجسته کردند.	ویشنو ۶ و همکاران (۲۰۱۹) تأمین‌کننده‌ای را قابل اعتماد می‌دانند که مقدار مناسبی از محصول با کیفیتی خاص در زمان مناسب را عرضه کند.
استراتژی طراحی محصول	به طور سیستماتیک عملکردهای اقتصادی، زیست محیطی و اجتماعی را در کل چرخه عمر محصول در نظر می‌گیرد (پاشایی و همکاران، ۱۴۰۱).	به کاهش حاشیه‌های ایمنی اضافی ناشی از استفاده از رویکردهای طراحی سنتی اشاره دارد (باسو و لی ۸، ۲۰۲۲).
تمرکز تولید	فن‌آوری‌ها و فرآیندهای تولید با مصرف کمتری از انرژی و منابع به آلودگی کمتر زیست محیطی کمک می‌کند (گائو ۸ و همکاران، ۲۰۰۹).	سرعت زیاد تولید به نقص بیشتر و خرابی مکرر ماشین‌آلات تولیدی می‌انجامد (مارچی ۷ و همکاران، ۲۰۱۹).
استراتژی توزیع	فشرده‌سازی بار و حمل و نقل قطعات بزرگتر می‌تواند هزینه‌ها و اثرات زیست محیطی زنجیره تأمین را کاهش دهد (مارچی ۱۰ و همکاران، ۲۰۱۹).	حمل و نقل در مسافت‌های طولانی، هزینه‌های لجستیک را به دلیل افزایش ریسک‌های قطع جریان‌ها، افزایش می‌دهد (جیانپرو و التنتوی ۹، التنتوی ۹، ۲۰۰۴).

1 Samuel

2 Angeles

6 Vishnu

7 Okwu & Tartibu

8 Basu & Lee



ارتباط با تأمین‌کنندگان و مشتریان	همکاری و ادغام در تمام مراحل از خرید مواد خام تا پایان مصرف توسط مشتریان را شامل می‌شود (امیریان و همکاران، ۲۰۲۲).	احتمال مکمل ریسک کمبود عرضه به عنوان قابلیت اطمینان زنجیره تأمین شناخته می‌شود (هاگسپیل ۸، ۲۰۱۶).
استراتژی موجودی	نیاز به فضای ذخیره‌سازی کمتر نتیجه‌ی کاهش ابعاد محصول (مانند تاشو کردن محصولات) است (گوتبرگ ۱۰ و همکاران، ۲۰۰۶).	افزایش بازدهی عواملی نظیر سرعت خودرو، قابلیت اطمینان راننده، تعداد دفعات تحویل و محل انبارها، سطح موجودی را کاهش می‌دهد (کلورلان ۹، ۲۰۰۸).
ساختار سازمانی	زنجیره تأمین حلقه بسته مستلزم یکپارچگی زنجیره رو به جلو و زنجیره معکوس است (حسن‌زاده و ژانگ ۱۲، ۲۰۱۳).	احتمال خرابی علاوه بر تسهیلات، برای مسیرهای اتصال بین تسهیلات نیز در نظر گرفته می‌شود (امرایی و یوشیموتو ۱۱، ۲۰۱۳).
چرخه عمر محصول	استفاده مجدد، امکان صرفه‌جویی قابل توجهی در منابع را فراهم می‌کند (ساروماتیز و می ۱۴، ۲۰۲۲).	قابلیت اطمینان محصول در تمام مراحل چرخه عمر باید کنترل شود (گریشکو ۱۳ و همکاران، ۲۰۱۸).
تأثیر بر کاهش ضایعات	گذار از یک مدل اقتصاد خطی به یک اقتصاد دایره‌ای، نیازمند اصلاح بخش مدیریت پسماند است (اسکندری‌ثانی و سفالگر، ۱۴۰۱).	محصولات برگشتی ساخته شده از قطعات با قابلیت اطمینان بالاتر، آسان‌تر و با هزینه کمتری مورد استفاده مجدد قرار گرفته یا بازیافت می‌شوند (غایبلو و همکاران، ۲۰۱۵).
رویکرد "طراحی برای"	به صورت گسترده و بیرونی است (گالایتسی ۱۶ و همکاران، ۲۰۲۱).	به صورت متمرکز و داخلی می‌باشد (گالایتسی ۱۵ و همکاران، ۲۰۲۱).

مقاله غایبلو و همکاران (۲۰۱۵) از اولین مطالعاتی است که به صورت همزمان ابعاد پایداری و قابلیت اطمینان را در مسئله طراحی شبکه زنجیره تأمین یکپارچه در نظر گرفته است. جریان مستقیم روی به حداقل رساندن هزینه و جریان معکوس روی اقدامات سبز مانند قابلیت اطمینان اجزای استفاده شده، سهولت بازیابی و سهولت جداسازی قطعات تمرکز دارند. به دنبال آن، خلیفه‌زاده و همکاران (۲۰۱۵) به طراحی یک شبکه زنجیره تأمین چهارسطحی با اهداف حداقل کردن هزینه‌های عملیاتی کل عناصر زنجیره تأمین و حداکثرسازی قابلیت اطمینان سیستم و در نظر گرفتن کمبود پرداختند. رحمانی و ماهودیان (۲۰۱۷)، مدل مسئله طراحی

- 1 Vishnu
- 2 Okwu & Tartibu
- 3 Basu & Lee
- 4 Marchi
- 5 Gao
- 6 Giunipero & Aly Eltantawy
- 7 Marchi
- 8 Hagspiel
- 9 Kleverlaan
- 10 Gottberg
- 11 Ohmori & Yoshimoto
- 12 Hasanzadeh & Zhang
- 13 Grishko
- 14 Psarommatis & May
- 15 Galaitsi
- 16 Galaitsi



شبکه زنجیره تأمین را با توجه به انتشار دی اکسید کربن و عامل قابلیت اطمینان پیشنهاد دادند. لی و همکاران (۲۰۱۹) اقدام به طراحی یک سیستم انرژی تجدیدپذیر ترکیبی^۲ به همراه سیستم نمک‌زدایی^۳ به صورت پایدار و قابل اطمینان با در نظر گرفتن سناریوهای عملیاتی مختلف با نوسان در تأمین انرژی تجدیدپذیر و تقاضای متغیر برای آب کردند. فضلی‌خلف و همکاران (۲۰۲۰) پایداری و قابلیت اطمینان را در طراحی یک شبکه رو به جلو زنجیره تأمین هیدروژن با وجود سه سطح تولیدکننده، انبار و مشتری در نظر گرفتند. تحقیق کابادرماس و اردوغان^۴ (۲۰۲۰) مربوط به طراحی شبکه زنجیره تأمین با توجه همزمان به پایداری و قابلیت اطمینان، نشان داد که استفاده از حمل و نقل چندحالتی، هزینه زنجیره تأمین و انتشار کربن را کاهش می‌دهد. نصرتی و ارشادی خمسه (۲۰۲۰) نیز برای طراحی شبکه‌های زنجیره تأمین با دو هدف حداکثرسازی قابلیت اطمینان و حداقل‌سازی هزینه‌ها بدون در نظر گرفتن بعد اجتماعی پایداری و حالت‌های مختلف حمل و نقل، مدلی به صورت تک محصولی و تک دوره‌ای ارائه کردند. تیرکلایی و همکاران (۲۰۲۰) در یک مطالعه موردی از زنجیره تأمین لامپ به دنبال کمینه کردن هزینه کل زنجیره، به حداکثر رساندن ارزش وزنی محصولات و به حداکثر رساندن قابلیت اطمینان بودند. وانگ^۵ و همکاران (۲۰۲۲) برای ارزیابی جامع قابلیت اطمینان سمت تقاضا، شاخص‌هایی از جمله میزان رضایت، تعداد بازارهای خرده‌فروشی ناراضی، کمبود محصولات تصفیه شده، کمبود یک بازار خرده‌فروشی واحد و متوسط مدت کمبود پیشنهاد کردند. اخیراً، فونگ و ان جی^۶ (۲۰۲۲) شاخص قابلیت اطمینان ائتلاف را برای اندازه‌گیری قابلیت اطمینان شبکه زنجیره ارزش روغن نخل تحت مدیریت زنجیره تأمین معرفی کردند. علاوه بر آن‌ها، گودرزی و همکاران (۲۰۲۲) یک زنجیره تأمین حلقه بسته چند هدفه و چند لایه‌ای را با توجه به مرکز مونتاز مشترک و اهداف حداقل‌سازی هزینه‌های کل زنجیره تأمین و حداکثرسازی قابلیت اطمینان تسهیلات و مسیرها فرموله کردند. جدول ۲ با درج ویژگی‌های مطالعات مرتبط، ضمن ارائه طبقه‌بندی دقیق‌تری از موضوع، خلأ موجود در ادبیات را نمایان می‌سازد.

جدول ۲. خلاصه پیشینه تحقیق

مرجع	ساختار شبکه	پیکربندی چندگانه					شرایط مسئله	
		هدف	محصول	دوره	حمل و نقل	مدل‌سازی	تجهیزات	سطح پایداری
فهمینیا و جبارزاده (۲۰۱۶)	OL	M	M	S	M	L	ND	TBL
ظهیری و همکاران (۲۰۱۷)	OL	M	M	M	M	L	ND	TBL
فتاحی و گوویندان (۲۰۱۸)	OL	S	S	M	M	L	ND	TBL
جبارزاده و همکاران (۲۰۱۸)	OL	M	S	S	S	L	ND	TBL

1 Li

2 hybrid renewable energy system (HRES)

3 Reverse Osmosis (RO)

4 Kabadurmus & Erdogan

5 Wang

6 Foong & Ng



N	TBL	ND	L	S	M	M	M	CL	زارع مهرجردی و لطفی (۲۰۱۹)
N	TBL	ND	L	M	M	M	M	OL	فضلی خلف و همکاران (۲۰۲۰)
C	TBL	ND	L	S	M	S	M	OL	حسینی مطلق و همکاران (۲۰۲۰)
N	TBL	ND	L	S	M	M	M	OL	تیرکلایی و همکاران (۲۰۲۰)
A	TBL	ND	L	S	M	S	M	OL	سائو و سان (۲۰۲۰)
N	TBL	ND	L	S	S	S	M	CL	فضلی خلف و همکاران (۲۰۲۱)
N	TBL	ND	L	S	M	M	M	CL	لطفی و همکاران (۲۰۲۱)
N	TBL	ND	L	S	S	M	M	CL	زارع مهرجردی و شفیعی (۲۰۲۱)
N	TBL	ND	L	S	S	M	M	OL	صادقی و همکاران (۲۰۲۱)
N	TBL	ND	L	S	M	M	S	OL	گوویندان و قلیزاده (۲۰۲۱)
N	TBL	ND	L	M	M	S	M	OL	سازور و همکاران (۲۰۲۱)
N	TBL	D	L	S	S	M	M	CL	اکبری کاسگری و همکاران (۲۰۲۲)
C	TBL	D	NL	M	M	M	M	CL	امیریان و همکاران (۲۰۲۲)
N	TBL	ND	L	S	M	M	S	OL	صالحی و همکاران (۲۰۲۲)
N	TBL	D	L	S	S	S	M	CL	طالعیزاده و همکاران (۲۰۲۲)
N	TBL	ND	L	M	M	M	M	OL	گودرزیان و همکاران (۲۰۲۲)
N	TBL	ND	L	S	M	M	M	CL	محمدی و نیکزاد (۲۰۲۲)
C	TBL	D	NL	M	M	M	M	CL	مطالعه حاضر

*راهنمای جدول

ساختار شبکه (OL: حلقه باز، CL: حلقه بسته)؛ پیکربندی (S: منفرد، M: چندگانه)



شرایط مسئله: مدل سازی (L: برنامه‌ریزی مختلط خطی عدد صحیح، NL: برنامه‌ریزی مختلط غیرخطی عدد صحیح)
قطعیت مدل (D: قطعی، ND: غیرقطعی)
سطح پایداری: (یک بعدی: SBL، دو بعدی: DBL، سه بعدی: TBL)
سطح قابلیت اطمینان: (N: گره، A: کمان، C: زنجیره)

مدل‌های ارائه شده برای طراحی شبکه زنجیره تأمین حلقه بسته در مطالعات پیشین، معمولاً به صورت مسائل تک هدفه، برای یک دوره زمانی و با مد نظر قرار دادن یک محصول مدل‌سازی شده‌اند. برخلاف کارهای قبلی، این پژوهش به بررسی موضوع طراحی شبکه زنجیره تأمین برای شرکت‌های تولید کننده محصولات با ارزش در پایان عمر با در نظر گرفتن احتمال خرابی برای تسهیلات، مسیرهای حمل و نقل، و همچنین وسایل نقلیه می‌پردازد. برخی از آن‌ها بالقوه هستند و باید تصمیم گرفت که کدام گره‌ها، پیوندها و وسایل نقلیه‌ی بالقوه به کار گرفته شوند. بدیهی است که اصلاح زنجیره تأمین طراحی شده و تدارکات مربوطه بسیار دشوار و پرهزینه خواهد بود. بنابراین، طراحی یک شبکه زنجیره تأمین پایدار و قابل اعتماد با وجود چندین نوع خرابی مهم است. به طور کلی، شرکت‌ها و نوآوری‌های این پژوهش نسبت به مطالعات قبلی به شرح زیر است:

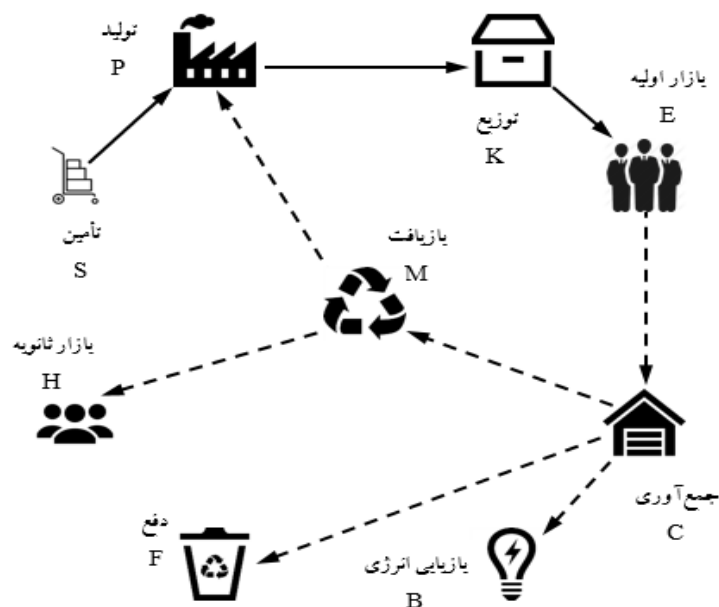
۱. معرفی مدل جدیدی برای طراحی شبکه زنجیره تأمین حلقه بسته چند هدفه، چند سطحی، چند محصولی و چند دوره‌ای با توجه همزمان به برنامه‌ریزی استراتژیک (به عنوان مثال، تصمیم‌گیری در مورد مکان تسهیلات و الگوی تخصیص آن‌ها) و برنامه‌ریزی تاکتیکی (یعنی جریان محصول بین تسهیلات رده‌های مختلف و سیاست بهینه موجودی در هر مرکز توزیع)
۲. ارزیابی بعد زیست محیطی مدل با گنجاندن هزینه انتشار CO2 ناشی از تمام منابع (احداث تأسیسات، انرژی مصرفی در فرآیندهای عملیاتی و سوخت مصرف شده در شبکه حمل و نقل) در تابع هدف اقتصادی (سودآوری) و سقف مجاز انتشار کربن در محدودیت‌ها، طبق مکانیزم سقف و مبادله
۳. اندازه‌گیری بعد اجتماعی در تابع هدف مسئولیت‌پذیری اجتماعی برای رعایت الزامات ISO 26000، با در نظر گرفتن تعداد فرصت‌های شغلی و توسعه متوازن اقتصادی ایجاد شده به دو صورت ثابت (ناشی از احداث تأسیسات) و متغیر (به ازای هر ساعت فعالیت عملیاتی)
۴. سنجش صحت عملکرد مدل در تابع هدف قابلیت اطمینان از طریق ارسال محصولات برای مشتریان به مقدار کافی و در زمان مناسب، در قالب موارد قابلیت اطمینان تأمین‌کنندگان انتخابی و تأسیسات احداث شده و همچنین قابلیت زمان سفر میان تسهیلات شبکه طراحی شده
۵. فراهم شدن امکان انتخاب کارآمدترین راه‌حل از میان مجموعه بهینه پارتو، همچنین امکان تعیین درجه بهینه بودن و اهمیت اهداف مختلف برای تصمیم‌گیرنده بر اساس بهینه‌سازی پیشنهاد شده

۳. مواد و روش‌ها

۳-۱. تعریف و ارائه مفروضات مسئله

در زنجیره تأمین مورد نظر، مواد اولیه توسط تأمین‌کنندگان و مراکز بازاریافت تأمین و به کارخانه‌ها تحویل می‌شود. کارخانه‌ها محصولات نهایی را تولید و آن‌ها را برای مراکز توزیع ارسال می‌دارند، مراکز توزیع نیز به منظور انبار و انتقال محصولات به مشتریان نهایی در سطح بعدی استقرار می‌یابند، در این سطح از زنجیره امکان نگهداری با شرط خروج از انبار حداکثر تا یک دوره زمانی قبل

از اتمام عمر برای محصولات وجود دارد. مشتریان محصولات مصرف شده را به مراکز جمع‌آوری می‌فروشند. محصولات بازگشتی با توجه به وضعیت کیفیتی که دارند (وابسته به زمان استفاده شده)، توسط مراکز جمع‌آوری به سه دسته‌ی باارزش، کم‌ارزش و بی‌ارزش تفکیک می‌شوند؛ مقادیر باارزش به منظور بازیافت به مراکز بازیافت منتقل می‌شوند، دسته‌ی کم‌ارزش به مراکز بازیابی انرژی فروخته می‌شوند و در نهایت مقادیر بی‌ارزش به عنوان ضایعات به مراکز دفع جهت دفن ایمن انتقال می‌یابند. مواد اولیه حاصل از بازیافت محصولات برگشتی با توجه به کیفیت مواد مورد استفاده در فرآیند بازیافت به دو بخش مواد اولیه مناسب برای تولید و مواد اولیه مناسب برای فروش در بازار مواد بازیافتی تقسیم می‌شوند. شکل ۱ نمایی از زنجیره تأمین توصیف شده را به نمایش گذاشته است.



شکل ۱. شماتیک شبکه زنجیره تأمین حلقه بسته پیشنهادی

مسئله اصلی مطالعه حاضر مربوط به ارائه یک مدل ریاضی برای طراحی شبکه زنجیره تأمین حلقه بسته با در نظر گرفتن ملاحظات پایداری و قابلیت اطمینان است. مفروضات مسئله در قالب موارد زیر خلاصه می‌شود.

۱. مدل به صورت چنددوره‌ای، چندمحصولی و چندسطحی در نظر گرفته شده است.
۲. سیستم مدیریت انبار در مراکز توزیع FIFO می‌باشد.
۳. سیستم در صورت عدم برآورد تقاضا به علت فقدان موجودی، متحمل هزینه کمبود خواهد شد.
۴. مجموع هزینه‌های انگیزشی، جمع‌آوری و بازیافت از هزینه خرید مواد اولیه جدید کمتر است.
۵. برای حمل و نقل محصولات بین تأسیسات مختلف از وسایل نقلیه ناهمگن با ظرفیت محدود استفاده می‌شود.

۳-۲. نمادگذاری و مدل‌سازی ریاضی

زنجیره تأمین حلقه بسته مورد بررسی به عنوان یک شبکه، از گره‌ها و کمان‌های زنجیره‌ی مستقیم $NF = (N_1, \psi', \psi'')$ و گره‌ها و کمان‌های زنجیره‌ی معکوس $NR = (N_2, \psi''', \psi''''')$ تشکیل شده است؛ که در آن N گره‌های گراف و ψ کمان‌های گراف می‌باشند. به طور کلی، مجموعه‌ها، پارامترها و متغیرهای مسئله نیز در جدول ۳ آورده شده است.



جدول ۳. نشانه‌ها، پارامترها و متغیرهای تصمیم در مسئله ریاضی

مجموعه‌ها:	
S	مجموعه مراکز تأمین کننده مواد اولیه $s = \{1, 2, \dots, S\}$
P	مجموعه مراکز بالقوه تولید $p = \{1, 2, \dots, P\}$
K	مجموعه مراکز بالقوه توزیع $k = \{1, 2, \dots, K\}$
E	مجموعه نقاط ثابت مشتری $e = \{1, 2, \dots, E\}$
C	مجموعه مراکز بالقوه جمع‌آوری $c = \{1, 2, \dots, C\}$
M	مجموعه مراکز بالقوه بازیافت $m = \{1, 2, \dots, M\}$
H	مجموعه نقاط ثابت بازار ثانویه $h = \{1, 2, \dots, H\}$
F	مجموعه مراکز انهدام $f = \{1, 2, \dots, F\}$
B	مجموعه مراکز بازیابی انرژی $b = \{1, 2, \dots, B\}$
A	مجموعه مواد اولیه $a = \{1, 2, \dots, A\}$
R	مجموعه محصولات $r = \{1, 2, \dots, R\}$
L	مجموعه مواد مورد استفاده برای بازیافت محصولات $l = \{1, 2, \dots, L\}$
G	مجموعه فن‌آوری‌های ذوب در مراکز تولید $g = \{1, 2, \dots, G\}$
I	مجموعه سطوح ظرفیت برای مراکز بالقوه $i = \{1, 2, \dots, I\}$
V	مجموعه وسایل نقلیه $v = \{1, 2, \dots, V\}$
T	مجموعه دوره زمانی $t = \{1, 2, \dots, T\}$
N_1	گره‌های زنجیره مستقیم $N_1 = \{S \cup P \cup K \cup E\}$
N_2	گره‌های زنجیره معکوس $N_2 = \{E \cup C \cup B \cup F \cup M \cup H\}$
ψ'	کمان‌های حمل محصول نهایی در زنجیره مستقیم $\psi' = \{(x, y) (x \in P, y \in K) \cup (x \in K, y \in E)\}$
ψ''	کمان حمل مواد خام در زنجیره مستقیم $\psi'' = \{(x, y) (x \in S, y \in P)\}$
ψ'''	کمان‌های حمل محصول نهایی در زنجیره معکوس $\psi''' = \{(x, y) (x \in E, y \in C) \cup (x \in C, y \in B) \cup (x \in C, y \in F) \cup (x \in C, y \in M)\}$
ψ''''	کمان‌های حمل مواد خام در زنجیره معکوس $\psi'''' = \{(x, y) (x \in M, y \in P) \cup (x \in M, y \in H)\}$
N	$N = \{N_1 \cup N_2\} - \{S \cup E \cup B \cup F \cup H\}$
پارامترها:	
SC_{sa}^t	هزینه تأمین یک واحد ماده اولیه a از تأمین کننده s در دوره زمانی t
PC_{pr}^{gt}	هزینه تولید محصول r در مرکز تولید p با فن‌آوری g در دوره زمانی t
KC_{kr}^t	هزینه توزیع محصول r در مرکز توزیع k در دوره زمانی t
HC_{kr}^t	هزینه نگهداری محصول r در مرکز توزیع k در دوره زمانی t
EC_{er}^t	هزینه عدم برآورد تقاضای مشتری e از محصول r در دوره زمانی t
OE_{er}^t	جریمه محصول r برگشتی جمع‌آوری نشده از مشتری e در دوره زمانی t



هزینه تفکیک و بسته‌بندی محصول برگشتی r در مرکز جمع‌آوری c در دوره زمانی t	CC_{cr}^t
هزینه انگیزشی برای خرید و جمع‌آوری محصول برگشتی r در مرکز جمع‌آوری c در دوره زمانی t	OCC_{cr}^t
هزینه بازیافت محصول برگشتی r در مرکز بازیافت m با مواد l در دوره زمانی t	MC_{mr}^{lt}
هزینه انهدام محصول r برگشتی در مرکز انهدام f در دوره زمانی t	FC_{fr}^t
فاصله بین دو تسهیل $\psi_1 \cup \psi_2$ ، $x, y \in \psi_1$ موجود در شبکه زنجیره تأمین حلقه مختلط	D_{xy}
تقاضای مشتری دست اول e از محصول r در دوره زمانی t	DEM_{er}^t
تقاضای ماده اولیه a در بازار ثانویه h در دوره زمانی t	DEM_{ha}^t
ظرفیت تأمین‌کننده s در تأمین ماده اولیه a در هر دوره	$TCAP_{sa}$
ظرفیت مرکز بازیافت m در تأمین ماده اولیه a در هر دوره	$TCAP_{ma}$
ظرفیت تولید کارخانه p از محصول r با سطح فن‌آوری g در هر دوره	$TCAP_{pr}^g$
ظرفیت مرکز توزیع k برای ارسال محصول r در هر دوره	$TCAP_{kr}$
ظرفیت مرکز جمع‌آوری c از محصول برگشتی r در هر دوره	$TCAP_{cr}$
ظرفیت مرکز بازیافت m از محصول برگشتی r با استفاده از مواد l در هر دوره	$TCAP_{mr}^l$
ظرفیت مرکز انهدام f از محصول برگشتی r در هر دوره	$TCAP_{fr}$
ظرفیت مرکز بازیابی انرژی b از محصول برگشتی r در هر دوره	$TCAP_{br}$
قیمت فروش یک واحد محصول r برای مشتری دست اول e در دوره زمانی t	PR_{er}^t
قیمت فروش یک واحد ماده خام a بازیافتی در بازار ثانویه h در دوره زمانی t	PR_{ha}^t
قیمت فروش یک واحد محصول r برگشتی برای مرکز بازیابی انرژی b در دوره زمانی t	PR_{br}^t
میزان انتشار گاز دی‌اکسید کربن توسط وسیله نقلیه v به ازای هر لیتر مصرف سوخت	E_v
مقدار مجاز انتشار دی‌اکسید کربن در شبکه زنجیره تأمین که دولت تعیین می‌کند	GOV_{co2}
میزان انتشار گاز دی‌اکسید کربن در اثر احداث مرکز توزیع k	E_k
میزان انتشار گاز دی‌اکسید کربن در اثر احداث مرکز تولید p با فن‌آوری g	E_p^g
میزان انتشار گاز دی‌اکسید کربن در اثر احداث مرکز بازیافت m با مواد l	E_m^l
میزان انتشار گاز دی‌اکسید کربن در اثر احداث مرکز جمع‌آوری c	E_c
میزان انتشار گاز دی‌اکسید کربن برای هر واحد وزن محصول r در مرکز تولید p با فن‌آوری g	E_{pr}^g
میزان انتشار گاز دی‌اکسید کربن برای هر واحد وزن محصول r برگشتی در مرکز بازیافت m با مواد l	E_{mr}^l
میزان انتشار گاز دی‌اکسید کربن برای هر واحد وزن محصول r برگشتی در مرکز انهدام f	E_{fr}
میزان انتشار گاز دی‌اکسید کربن برای هر واحد وزن محصول r برگشتی در مرکز بازیابی انرژی b	E_{br}
هزینه ثابت انتشار بیش از حد مجاز گاز دی‌اکسید کربن	θ
میزان سوخت مصرفی در واحد مسافت برای خودروی v در حالت بدون بار	$FU1_v$
میزان سوخت اضافی مصرفی در واحد مسافت برای خودروی v برای واحد بار	$FU2_v$
هزینه هر لیتر سوخت مصرفی برای خودروی v در دوره t	V_v^t
هزینه ثابت بکارگیری خودروی v در دوره t	F_v^t
هزینه ثابت احداث تسهیل بالقوه x ($x \in K, C$) با سطح ظرفیت i	FC_x^i
هزینه ثابت احداث مرکز تولید بالقوه p با سطح ظرفیت i با فن‌آوری g	FC_p^{ig}
هزینه ثابت احداث مرکز بازیافت بالقوه m با سطح ظرفیت i و استفاده از مواد l	FC_m^{il}



نسبت ماده خام a در محصول r $\forall r \in R$ $\sum_{a \in A} q_{ar} = 1$	q_{ar}
نسبت ماده خام a در محصول برگشتی r $\forall r \in R$ $\sum_{a \in A} \rho_{ar} = 1$	ρ_{ar}
درصدی از محصول r بازگشت داده شده توسط مشتری e در دوره زمانی t	α_{er}^t
درصدی از محصول r قابل انتقال به مرکز بازاریابی انرژی توسط مرکز جمع‌آوری c در دوره زمانی t	β_{cr}^t
درصدی از محصول r قابل انتقال به مرکز بازیافت توسط مرکز جمع‌آوری c در دوره زمانی t	γ_{cr}^t
$\beta_{cr}^t + \gamma_{cr}^t < 1, \forall c, r, t$	
درصدی از ماده اولیه a انتقال یافته به مرکز تولید توسط مرکز بازیافت m در دوره زمانی t	σ_{ma}^t
حداقل میزان ماده اولیه a که توسط مرکز x ($x \in S$) در دوره زمانی t تأمین می‌شود	b_{xa}^t
میزان اهمیت یا ضریب وزنی $Trange_{xy}$	w_1
میزان اهمیت یا ضریب وزنی $Tratio_{xy}$	w_2
وزن یک واحد محصول r	w_r
وزن یک واحد ماده اولیه a	w_a
حجم یک واحد محصول r	v_r
حجم یک واحد ماده اولیه a	v_a
ظرفیت وزنی وسیله نقلیه v	$WCAP_v$
ظرفیت حجمی وسیله نقلیه v	$VCAP_v$
هزینه دستمزد راننده به ازای واحد زمانی در دوره t	F_d^t
عدد ثابت مربوط به مسیر که شامل شیب جاده، شتاب، و مقاومت در برابر چرخش است	α_{xy}
مقدار ثابت مربوط به وسیله نقلیه که به تراکم هوا، کشیدن و سطح مقابل وسیله نقلیه متکی است	β^v
میانگین سرعت وسیله نقلیه نوع v در مسیر بین مبدأ x و مقصد y در دوره زمانی t	τ_{xy}^{vt}
$\tau_{xy}^{vt} = (L_{xy} + U_{xy})/2$	
حد پایین سرعت در مسیر بین x و y	L_{xy}
حد بالای سرعت در مسیر بین x و y	U_{xy}
ضریب اهمیت تعداد فرصت شغلی ایجاد شده	θ_{job}
تعداد فرصت شغلی ایجاد شده در اثر احداث مرکز تولید p با فن‌آوری g	JOB_p^g
تعداد فرصت شغلی ایجاد شده در اثر احداث مرکز توزیع k	JOB_k
تعداد فرصت شغلی ایجاد شده در اثر احداث مرکز جمع‌آوری c	JOB_c
تعداد فرصت شغلی ایجاد شده در اثر احداث مرکز بازیافت m با استفاده از مواد l	JOB_m^l
ضریب اهمیت تعداد کل روزهای از دست رفته ناشی از آسیب دیدگی در محیط کار	φ_{ald}
متوسط تعداد روزهای از دست رفته به دلیل آسیب دیدگی کاری در اثر احداث مرکز تولید p با فن‌آوری g	ALD_p^g
متوسط تعداد روزهای از دست رفته به دلیل آسیب دیدگی کاری در اثر احداث مرکز بازیافت m با استفاده از مواد l	ALD_m^l
	l
قابلیت اطمینان زمان سفر برای مسیر بین تسهیلات ψ_1 و ψ_2 $(x, y) \in \psi_1 \cup \psi_2$	TTR_{xy}
نسبت اختلاف بین حداکثر و حداقل زمان سفر به حداکثر زمان سفر بین تسهیلات ψ_1 و ψ_2 $(x, y) \in \psi_1 \cup \psi_2$	$Trange_{xy}$
نسبت میانگین زمان سفر به حداکثر زمان سفر مجاز بین تسهیلات ψ_1 و ψ_2 $(x, y) \in \psi_1 \cup \psi_2$	$Tratio_{xy}$
قابلیت اطمینان تسهیل بالقوه مرکز تولید p با فن‌آوری تولیدی g	R_p^g
قابلیت اطمینان تسهیل بالقوه مرکز توزیع k	R_k



عدد بسیار بزرگ	$BigM$
کل بودجه تأسیس تسهیلات	D
	متغیرهای تصمیم
تعداد مواد خام نوع a که توسط وسیله نقلیه v بین تسهیلات $(x, y) \in \Psi_1$ در دوره زمانی t انتقال می‌یابد	Q_{xya}^{vt}
تعداد محصول نوع r که توسط وسیله نقلیه v بین تسهیلات $(x, y) \in \Psi_2$ در دوره زمانی t انتقال می‌یابد	Q_{xyr}^{vt}
تعداد محصول r برگشتی جمع‌آوری نشده از مشتری e در دوره زمانی t	QN_{er}^t
کمبود رخ داده از محصول r برای مشتری e در دوره زمانی t	S_{er}^t
تعداد موجودی محصول r در مرکز توزیع k در دوره زمانی t	I_{kr}^t
۱، اگر ماده اولیه a توسط مرکز x ($x \in S$) در دوره زمانی t تأمین شود ۰، در غیر این صورت	Z_{xa}^t
۱، اگر ماده اولیه a از مرکز x ($x \in S$) به مرکز y ($y \in P$) در دوره زمانی t ارسال شود ۰، در غیر این صورت	Z_{xya}^t
۱، اگر تسهیل بالقوه x ($x \in K, C$) در سطح ظرفیت i باز شود ۰، در غیر این صورت	θ_x^i
۱، اگر تسهیل بالقوه x ($x \in P$) در سطح ظرفیت i با فن‌آوری g باز شود ۰، در غیر این صورت	θ_x^{ig}
۱، اگر تسهیل بالقوه x ($x \in M$) در سطح ظرفیت i با استفاده از مواد l باز شود ۰، در غیر این صورت	θ_x^{il}
۱، اگر مسیر انتقال بین دو مرکز x و y ($(x, y) \in \Psi_1 \cup \Psi_2$)، توسط خودروی v در دوره t طی شود ۰، در غیر این صورت	π_{xy}^{vt}

طبق بیان مسئله، مدل‌سازی مسئله طراحی شبکه زنجیره تأمین پایدار و قابل اطمینان به عنوان یک مدل برنامه‌ریزی ریاضی غیرخطی مختلط عدد صحیح در ادامه نمایش داده شده است که شامل توابع هدف حداکثرسازی سودآوری اقتصادی و حفاظت زیست محیطی (معرف پایداری مسئله)، حداکثرسازی مسئولیت‌پذیری اجتماعی (معرف پایداری) و همچنین حداکثرسازی قابلیت اطمینان (معرف کیفیت) می‌باشد. تابع هدف اول عبارت است از بیشینه‌سازی سود زنجیره تأمین که حاصل اختلاف جمع کل درآمدها از جمع کل هزینه‌های زنجیره تأمین می‌باشد (رابطه ۱). قسمت اول تابع هدف جمع کل درآمدهای زنجیره تأمین را نشان می‌دهد که برابر است با درآمد حاصل از فروش محصولات نهایی به مشتریان، محصولات برگشتی به مراکز بازاریابی انرژی و مواد بازیافتی به سایر زنجیره‌های تأمین. قسمت دوم هزینه‌های زنجیره تأمین را نشان می‌دهد که شامل هزینه‌های ثابت، هزینه‌های عملیاتی، هزینه‌های حمل و نقل و هزینه‌های ناشی از انتشار بیش از حد مجاز دی‌اکسید کربن، می‌باشد.

هزینه‌های ثابت (OFC) شامل: هزینه استقرار تسهیلات بالقوه، هزینه قرارداد با تأمین‌کنندگان و هزینه بکارگیری وسایل نقلیه؛ می‌شود. هزینه خرید مواد اولیه، هزینه تولید، هزینه توزیع، هزینه بازرسی و جداسازی، هزینه بازیافت و هزینه دفن؛ جزء هزینه‌های اصلی در اجرای فعالیت‌های عملیاتی زنجیره تأمین (OC) محسوب می‌شوند، البته هزینه‌های انگیزشی (هزینه خرید و جمع‌آوری محصولات برگشتی در پایان عمر از مشتریان)، هزینه‌های موجودی (هزینه نگهداری محصولات نهایی در انبار مراکز توزیع)، هزینه‌های جریمه (جریمه عدم برآورد تقاضای مشتریان و جریمه عدم جمع‌آوری محصولات برگشتی) نیز در قالب هزینه‌های عملیاتی گنجانده شده‌اند. در ضمن هزینه ناشی از صرفه‌جویی ارائه مواد اولیه بازیافتی به مراکز تولید با علامت منفی از هزینه‌های عملیاتی



کم شده است. مقدار عبارت TC، هزینه‌های حمل و نقل (هزینه سوخت مصرفی و دستمزد راننده) شبکه زنجیره تأمین را نشان می‌دهد. هزینه سوخت مصرفی با توجه به نوع وسیله نقلیه و میزان بار حمل شده و مسافت طی شده متفاوت خواهد بود. هزینه دستمزد راننده نیز وابسته به مدت زمان رانندگی متغیر است. مدت زمان رانندگی تابعی از میانگین سرعت و وسیله نقلیه و مسافت طی شده توسط آن می‌باشد. هزینه انتشار بیش از حد مجاز دی اکسید کربن (EC)، حاصل ضرب فاکتور هزینه انتشار دی اکسید کربن در اختلاف میان میزان انتشار دی اکسید کربن جاری از مقدار مجاز انتشار دی اکسید کربن زنجیره تأمین که دولت تعیین کرده است، به دست می‌آید. مقدار انتشار دی اکسید کربن در زنجیره تأمین، حاصل جمع مقدار ثابت انتشار ناشی از استقرار تسهیلات بالقوه و میزان متغیر انتشار ناشی از انرژی مصرف شده در فرآیندهای عملیاتی و حمل و نقل میان سطوح زنجیره می‌باشد.

Maximize Z1 = Economic Profit

(۱)

Economic Profit = Revenue at MLSCND – Cost at MLSCND

$$\text{Revenue at MLSCND} = \sum_{v \in V} \sum_{t \in T} \left[\sum_{x \in K} \sum_{y \in E} \sum_{r \in R} PR_{er}^t Q_{ker}^{vt} + \sum_{x \in C} \sum_{y \in B} \sum_{r \in R} PR_{br}^t Q_{cbr}^{vt} + \sum_{x \in M} \sum_{y \in H} \sum_{a \in A} PR_{ha}^t Q_{mha}^{vt} \right]$$

Cost at MLSCND

= Opening Facility Cost (OFC) + Operation Cost (OC) + Transportation Cost (TC) + Emission CO2 Cost (EC)

$$OFC = \sum_{x \in P} \sum_{i \in I} \sum_{g \in G} FC_x^{ig} \theta_x^{ig} + \sum_{x \in M} \sum_{i \in I} \sum_{l \in L} FC_x^{il} \theta_x^{il} + \sum_{x \in KUC} \sum_{i \in I} FC_x^i \theta_x^i$$

$$OC = \sum_{t \in T} \left[\sum_{x \in S} \sum_{y \in P} \sum_{a \in A} \sum_{v \in V} S_{xa}^t Q_{spa}^{vt} + \sum_{x \in P} \sum_{y \in K} \sum_{r \in R} \sum_{g \in G} \sum_{v \in V} PC_{xr}^{gt} Q_{xkr}^{vt} + \sum_{x \in K} \sum_{r \in R} \left(\sum_{y \in E} \sum_{v \in V} KC_{xr}^t Q_{xyr}^{vt} + HC_{xr}^t I_{xr}^t \right) \right. \\ \left. + \sum_{x \in E} \sum_{r \in R} (EC_{xr}^t S_{xr}^t + OEC_{xr}^t Q_{N_{xr}}^t) + \sum_{x \in E} \sum_{y \in C} \sum_{r \in R} \sum_{v \in V} (CC_{yr}^t + OCC_{yr}^t) Q_{xyr}^{vt} \right. \\ \left. + \sum_{x \in C} \sum_{y \in M} \sum_{r \in R} \sum_{i \in I} \sum_{v \in V} MC_{yr}^{it} Q_{xyr}^{vt} + \sum_{x \in C} \sum_{y \in F} \sum_{r \in R} \sum_{v \in V} FC_{yr}^t Q_{xyr}^{vt} \right]$$

$$TC = \sum_{v \in V} \sum_{t \in T} \left[\sum_{(x,y) \in \Psi_1} \sum_{a \in A} \left((V_v^t (\alpha_{xy} (FU1_v + FU2_v W_a Q_{xya}^{vt}) + \beta^v (\tau_{xy}^{vt})^2) + F_d^t / \tau_{xy}^{vt}) D_{xy} + F_v^t \right) \pi_{xy}^{vt} \right. \\ \left. + \sum_{(x,y) \in \Psi_2} \sum_{r \in R} \left((V_v^t (\alpha_{xy} (FU1_v + FU2_v W_r Q_{xyr}^{vt}) + \beta^v (\tau_{xy}^{vt})^2) + F_d^t / \tau_{xy}^{vt}) D_{xy} + F_v^t \right) \pi_{xy}^{vt} \right]$$

EC = $\vartheta(MLSCND_{co2} - GOV_{co2})$

MLSCND_{co2} = OF_{co2} + T_{co2} + O_{co2}

$$OF_{co2} = \sum_{x \in P} \sum_{g \in G} E_x^g \theta_x^g + \sum_{x \in M} \sum_{l \in L} E_x^l \theta_x^l + \sum_{x \in KUC} E_x \theta_x$$

$$T_{co2} = \sum_{v \in V} \sum_{t \in T} \left[\sum_{(x,y) \in \Psi_1} \sum_{a \in A} E_v (\alpha_{xy} (FU1_v + FU2_v W_a Q_{xya}^{vt}) + \beta^v (\tau_{xy}^{vt})^2) D_{xy} \pi_{xy}^{vt} \right. \\ \left. + \sum_{(x,y) \in \Psi_2} \sum_{r \in R} E_v (\alpha_{xy} (FU1_v + FU2_v W_r Q_{xyr}^{vt}) + \beta^v (\tau_{xy}^{vt})^2) D_{xy} \pi_{xy}^{vt} \right]$$

$$O_{co2} = \sum_{r \in R} \sum_{v \in V} \sum_{t \in T} \left[\sum_{x \in P} \sum_{y \in K} \sum_{g \in G} E_{xr}^g W_r Q_{xyr}^{vt} + \sum_{x \in C} \sum_{y \in BUF} E_{yr} W_r Q_{xyr}^{vt} + \sum_{x \in C} \sum_{y \in M} \sum_{l \in L} E_{yr}^l W_r Q_{xyr}^{vt} \right]$$



تابع هدف دوم حداکثرسازی مسئولیت‌پذیری اجتماعی زنجیره تأمین را دنبال می‌کند (رابطه ۲). به همین منظور از دو معیار فرصت‌های شغلی ایجاد شده و متوسط تعداد روزهای کاری از دست رفته ناشی از آسیب‌دیدگی پرسنل مطابق میزان اهمیت‌شان استفاده می‌شود. هر دو معیار مشخص شده از دو جنبه ثابت و متغیر مورد ارزیابی قرار می‌گیرند. مدل سعی در استقرار تسهیلات بالقوه در مناطق با درصد بیکاری بیشتر دارد، که این امر موجب ایجاد اشتغال در مناطق محروم‌تر می‌شود. رابطه ۳، تابع هدف بیشینه‌سازی قابلیت اطمینان زنجیره تأمین است.

Maximize Z2 = Social Responsibility

(۲)

$$\text{Social Responsibility} = \theta_{\text{job}} \left(\sum_{x \in P} \sum_{g \in G} \text{JOB}_x^g \theta_x^g + \sum_{x \in K \cup C} \text{JOB}_x \theta_x + \sum_{x \in M} \sum_{l \in L} \text{JOB}_x^l \theta_x^l \right) - \varphi_{\text{ald}} \left(\sum_{x \in P} \sum_{g \in G} \text{ALD}_x^g \theta_x^g + \sum_{x \in M} \sum_{l \in L} \text{ALD}_x^l \theta_x^l \right)$$

Maximize Z3 = Reliability of MLSCND

(۳)

Reliability of MLSCND = Operation Reliability + Transportation Reliability

$$\text{Transportation Reliability} \equiv \text{TTR}_{xy} = \sum_{(x,y) \in \Psi' \cup \Psi''} \sum_{v \in V} \sum_{t \in T} [w_1(1 - \text{Trange}_{xy}) + w_2(\text{Tratio}_{xy})] \pi_{xy}^{vt}$$

$$\text{Operation Reliability} = \left[1 - \prod_{x \in P} \prod_{g \in G} (1 - R_x^g \theta_x^g) \right] * \left[1 - \prod_{x \in K} (1 - R_x \theta_x) \right]$$

در ادامه محدودیت‌های مسئله ارائه می‌شود.

محدودیت‌ها:

$$\sum_{x \in K} \sum_{v \in V} Q_{xyr}^{vt} + S_{yr}^t - S_{yr}^{t-1} = \text{DEM}_{yr}^t, \quad \forall y \in E, r \in R, t > 1 \in T \quad (۴)$$

$$\alpha_{er}^t (\text{DEM}_{yr}^{t-1} - S_{yr}^{t-1}) \geq \sum_{x \in C} \sum_{v \in V} Q_{yxr}^{vt}, \quad \forall y \in E, r \in R, t > 1 \in T \quad (۵)$$

$$\sum_{x \in P} \sum_{i \in I} \sum_{g \in G} FC_x^{ig} \theta_x^{ig} + \sum_{x \in M} \sum_{i \in I} \sum_{l \in L} FC_x^{il} \theta_x^{il} + \sum_{x \in K \cup C} \sum_{i \in I} FC_x^i \theta_x^i \leq D \quad (۶)$$

$$\alpha_{er}^t (\text{DEM}_{yr}^{t-1} - S_{yr}^{t-1}) - \sum_{x \in C} \sum_{v \in V} Q_{yxr}^{vt} = \text{QN}_{er}^t, \quad \forall y \in E, r \in R, t > 1 \in T \quad (۷)$$

$$I_{yr}^t = I_{yr}^{t-1} + \sum_{x \in P} \sum_{v \in V} Q_{xyr}^{vt} - \sum_{x \in E} \sum_{v \in V} Q_{yxr}^{vt}, \quad \forall y \in K, r \in R, t > 1 \in T \quad (۸)$$

$$\sum_{x \in S} \sum_{v \in V} Q_{xya}^{vt} + \sum_{x \in M} \sum_{v \in V} Q_{xya}^{vt} = \sum_{x \in K} \sum_{r \in R} \sum_{v \in V} Q_{yxr}^{vt} \cdot q_{ar}, \quad \forall y \in P, a \in A, t \in T \quad (۹)$$

$$\beta_{cr}^t \sum_{x \in E} \sum_{v \in V} Q_{xyr}^{vt} = \sum_{x \in B} \sum_{v \in V} Q_{yxr}^{vt}, \quad \forall y \in C, r \in R, t \in T \quad (۱۰)$$

$$\gamma_{cr}^t \sum_{x \in E} \sum_{v \in V} Q_{xyr}^{vt} = \sum_{x \in M} \sum_{v \in V} Q_{yxr}^{vt}, \quad \forall y \in C, r \in R, t \in T \quad (۱۱)$$

$$\sum_{x \in E} \sum_{v \in V} Q_{xyr}^{vt} = \sum_{x \in B} \sum_{v \in V} Q_{yxr}^{vt} + \sum_{x \in M} \sum_{v \in V} Q_{yxr}^{vt} + \sum_{x \in F} \sum_{v \in V} Q_{yxr}^{vt}, \quad \forall y \in C, r \in R, t \in T \quad (۱۲)$$

$$\beta_{xr}^t + \gamma_{xr}^t < 1, \quad \forall x \in C, r \in R, t \in T \quad (۱۳)$$

$$\sigma_{ma}^t \sum_{x \in C} \sum_{r \in R} \sum_{v \in V} \rho_{ar} \cdot Q_{xyr}^{vt} = \sum_{x \in P} \sum_{v \in V} Q_{yxa}^{vt}, \quad \forall y \in M, a \in A, t \in T \quad (۱۴)$$

$$(1 - \sigma_{ma}^t) \sum_{x \in C} \sum_{r \in R} \sum_{v \in V} \rho_{ar} \cdot Q_{xyr}^{vt} = \sum_{x \in H} \sum_{v \in V} Q_{yxa}^{vt}, \quad \forall y \in M, a \in A, t \in T \quad (۱۵)$$



$$\sum_{x \in M} \sum_{v \in V} Q_{xya}^{vt} \geq DEM_{ya}^t, \quad \forall y \in H, a \in A, t \in T \quad (16)$$

$$\sum_{a \in A} q_{ar} = 1, \forall r \in R \quad (17)$$

$$\sum_{a \in A} \rho_{ar} = 1, \forall r \in R \quad (18)$$

$$\sum_{y \in P} \sum_{v \in V} Q_{xya}^{vt} \leq TCAP_{xa} \cdot Z_{xa}^t, \quad \forall x \in S, a \in A, t \in T \quad (19)$$

$$\sum_{x \in S} \sum_{v \in V} Q_{xya}^{vt} \leq TCAP_{xa} \cdot Z_{xa}^t, \quad \forall y \in P, a \in A, t \in T \quad (20)$$

$$\sum_{y \in P} \sum_{v \in V} Q_{xya}^{vt} \geq b_{xa}^t \cdot Z_{xa}^t, \quad \forall x \in S, a \in A, t \in T \quad (21)$$

$$\sum_{v \in V} Q_{xya}^{vt} \leq BigM \cdot Z_{xya}^t, \quad \forall x \in S, y \in P, a \in A, t \in T \quad (22)$$

$$Z_{xya}^t \leq Z_{xa}^t, \quad \forall x \in S, y \in P, a \in A, t \in T \quad (23)$$

$$\sum_{y \in K} \sum_{v \in V} Q_{xyr}^{vt} \leq TCAP_{xr}^g \cdot \theta_x^g, \quad \forall x \in P, r \in R, g \in G, t \in T \quad (24)$$

$$\sum_{x \in S} \sum_{v \in V} Q_{xya}^{vt} + \sum_{x \in M} \sum_{v \in V} Q_{xya}^{vt} \leq \theta_x^g \sum_{r \in R} TCAP_{xr}^g \cdot q_{ar}, \quad \forall y \in P, a \in A, g \in G, t \in T \quad (25)$$

$$I_{xr}^t + \sum_{y \in E} \sum_{v \in V} Q_{xyr}^{vt} \leq TCAP_{xr} \cdot \theta_x, \quad \forall x \in K, r \in R, t \in T \quad (26)$$

$$\sum_{x \in E} \sum_{v \in V} Q_{xyr}^{vt} \leq TCAP_{yr} \cdot \theta_y, \quad \forall y \in C, r \in R, t \in T \quad (27)$$

$$\sum_{x \in C} \sum_{v \in V} Q_{xyr}^{vt} \leq \sum_{r \in R} TCAP_{yr}^l \cdot \theta_y^l, \quad \forall y \in M, r \in R, l \in L, t \in T \quad (28)$$

$$\sum_{y \in P} \sum_{v \in V} Q_{xya}^{vt} + \sum_{y \in H} \sum_{v \in V} Q_{xya}^{vt} \leq \theta_x^l \sum_{r \in R} TCAP_{xr}^l \cdot \rho_{ar}, \quad \forall x \in M, a \in A, l \in L, t \in T \quad (29)$$

$$\sum_{x \in C} \sum_{v \in V} Q_{xyr}^{vt} \leq TCAP_{yr}, \quad \forall y \in F, r \in R, t \in T \quad (30)$$

$$\sum_{x \in C} \sum_{v \in V} Q_{xyr}^{vt} \leq TCAP_{yr}, \quad \forall y \in B, r \in R, t \in T \quad (31)$$

$$\sum_{i \in I} \theta_x^i \leq 1, \forall x \in K \cup C \quad (32)$$

$$\sum_{i \in I} \sum_{g \in G} \theta_x^{ig} \leq 1, \quad \forall x \in P \quad (33)$$

$$\sum_{i \in I} \sum_{l \in L} \theta_x^{il} \leq 1, \quad \forall x \in M \quad (34)$$

$$\sum_{a \in A} w_a \cdot Q_{xya}^{vt} \leq WCAP_v \cdot \pi_{xy}^{vt}, \quad \forall (x, y) \in \psi_1, v \in V, t \in T \quad (35)$$

$$\sum_{a \in A} v_a \cdot Q_{xya}^{vt} \leq VCAP_v \cdot \pi_{xy}^{vt}, \quad \forall (x, y) \in \psi_1, v \in V, t \in T \quad (36)$$

$$\sum_{r \in R} w_r \cdot Q_{xyr}^{vt} \leq WCAP_v \cdot \pi_{xy}^{vt}, \quad \forall (x, y) \in \psi_2, v \in V, t \in T \quad (37)$$

$$\sum_{r \in R} v_r \cdot Q_{xyr}^{vt} \leq VCAP_v \cdot \pi_{xy}^{vt}, \quad \forall (x, y) \in \psi_2, v \in V, t \in T \quad (38)$$

$$\sum_{v \in V} \pi_{xy}^{vt} \leq 1, \forall (x, y) \in \psi_1 \cup \psi_2, t \in T \quad (39)$$

$$\tau_{xy}^{vt} = (L_{xy} + U_{xy})/2 \quad (40)$$



$$Trange_{xy} = \frac{(Tmax_{xy} - Tmin_{xy})}{Tmax_{xy}} \quad (41)$$

$$Tratio_{xy} = \frac{Tmid_{xy}}{Tmax_{xy}} \quad (42)$$

$$Tmax_{xy} = \frac{D_{xy}}{L_{xy}} \quad (43)$$

$$Tmin_{xy} = \frac{D_{xy}}{U_{xy}} \quad (44)$$

$$Tmid_{xy} = \frac{(Tmax_{xy} + Tmin_{xy})}{2} \quad (45)$$

$$Z_{xa}^t, Z_{xya}^t, \theta_x, \theta_x^g, \theta_x^l, \pi_{xy}^{vt} \in \{0,1\} \quad (46)$$

$$Q_{xya}^{vt}, Q_{xyr}^{vt}, QN_{er}^t, S_{er}^t, I_{kr}^t, N_{pi}^{jt} \geq 0, integer, I_{kr}^0 = 0 \quad (47)$$

محدودیت (۱۷) بیانگر این است که مجموع نسبت‌های ماده خام نوع a در یک محصول برابر یک می‌باشد. به همین ترتیب محدودیت (۱۸) بیانگر این است که مجموع نسبت‌های ماده خام نوع a در یک محصول برگشتی نیز برابر یک می‌باشد. حداکثر ظرفیت تأمین‌کننده توسط محدودیت (۱۹) و (۲۰) تعیین می‌شود. حداقل مقدار تأمین مواد اولیه در صورت انتخاب و اخذ قرارداد با تأمین‌کننده، طبق محدودیت (۲۱) مشخص می‌شود. محدودیت‌های جریان ورودی و خروجی اقلام از تسهیلات، محدودیت‌های (۲۲) و (۲۳) تضمین می‌کنند که جریان بین تسهیلات زمانی شکل می‌گیرد که تسهیلات قبل از آن ایجاد شده باشد. محدودیت‌های (۲۴) تا (۳۱) با تأثیرگذاری فن‌آوری تولیدی مورد استفاده در مراکز تولید، حداکثر ظرفیت تولید، حداکثر ظرفیت عملیاتی و انبارش مراکز توزیع و حداکثر ظرفیت عملیاتی مراکز جمع‌آوری، حداکثر ظرفیت بازیافت مواد اولیه در مراکز بازیافت با توجه به نقش مواد استفاده شده در عملیات بازیافت، ظرفیت مراکز بازیابی انرژی و مراکز دفن را مشخص می‌کنند.

محدودیت (۳۲) تا (۳۴) به ترتیب بیانگر این است که در کل سطوح ظرفیتی حداکثر یک تسهیل بالقوه فعال است، در کل سطوح ظرفیتی با تمامی فناوری‌ها حداکثر یک تسهیل فعال است و در کل سطوح ظرفیتی با استفاده از تمامی مواد، حداکثر یک تسهیل فعال می‌باشد. محدودیت‌های (۳۵) تا (۳۸) نشان دهنده حداکثر ظرفیت وزنی و حداکثر ظرفیت حجمی وسایل نقلیه مورد استفاده می‌باشد. محدودیت (۳۹) بیان می‌کند که حداکثر یک مسیر انتقال بین هر دو مرکز توسط تمامی خودروها طی می‌شود. محدودیت (۴۰) بیانگر میانگین سرعت وسیله نقلیه نوع v در مسیر بین مبدأ x و مقصد y در دوره زمانی t می‌باشد. محدودیت‌های (۴۱) تا (۴۵) بیانگر نسبت اختلاف بین حداکثر و حداقل زمان سفر به حداکثر زمان سفر بین تسهیلات، و نسبت میانگین زمان سفر به حداکثر زمان سفر مجاز بین تسهیلات، حداکثر و حداقل زمان سفر و میانگین زمان سفر می‌باشند. در نهایت محدودیت‌های منطقی متغیرهای صفر و یک و متغیرهای پیوسته در قالب روابط (۴۶) و (۴۷) ارائه می‌شود.

۳-۳. روش حل مسئله

روش‌های حل مسائل بهینه‌سازی چندهدفه، به روش‌های بدون دخالت تصمیم‌گیرنده در روند حل مسئله و روش‌های اعمال اطلاعات ترجیحی تصمیم‌گیرنده در فرآیند حل مسئله تقسیم می‌شوند، که دسته‌ی دوم خود شامل روش‌های پیشینی ۱، پسینی ۲ و تعاملی ۳ می‌باشد (هوآنگ و ماسود، ۲۰۱۲). روش‌های پسینی به دلیل این که مجموعه پارتو را در اختیار تصمیم‌گیرنده قرار داده و

1 Posteriori

2 Priori

3 Interactive

4 Hwang & Masud



به وی حق انتخاب می‌دهند، از محبوبیت بالاتری برخوردارند. در بین روش‌های پسینی، روش محدودیت اپسیلون از جمله روش‌های پرکاربرد محسوب می‌شود. در اجرای روش محدودیت اپسیلون معمولی سه نقطه ضعف دیده می‌شود. اول، انتخاب مقدار مناسب برای پارامتر ϵ در تعیین دامنه توابع اهداف (به ویژه مقادیر ضدایده‌آل)، به منظور دستیابی به توزیع مناسبی از جواب‌های بهینه با تعداد دل‌خواه. دوم، تولید جواب‌های پارتویی ضعیف و عدم تضمین کارایی مجموعه جواب به دست آمده، سوم، افزایش زمان حل مسئله با اضافه شدن تعداد اهداف (ماوروتاس^۱، ۲۰۰۹). از این رو، روش محدودیت اپسیلون تکامل یافته^۲ برای غلبه بر این نقاط ضعف، پیشنهاد شده است (ماوروتاس^۳، ۲۰۱۳).

در روش AEC، نتایج بهینه‌سازی انفرادی توابع اهداف برای تکمیل جدول موازنه (بازه مقادیر ϵ) طبق بهینه‌سازی لکسیوگرافی محاسبه می‌شود. همچنین، محدودیت‌های توابع اهداف با ترکیب متغیرهای کمکی مناسب به برابری تبدیل می‌شوند. استفاده از این متغیرهای کمکی در تابع هدف به عنوان اصطلاح دوم، (اولویت پایین‌تر نسبت به روش لکسیوگرافی)، مدل را مجبور می‌کند که فقط جواب‌های پارتو تولید کند (ماوروتاس^۳، ۲۰۱۳). در صورت نشدن بودن مسئله الگوریتم حل متوقف شده و برای تکرارهای بعدی حل نمی‌شود که این امر سبب افزایش سرعت حل آن نسبت به روش محدودیت اپسیلون معمولی شده است. در واقع، بین تعداد جواب‌های پارتو تولید شده و زمان محاسبه بده-بستان وجود دارد؛ و تراکم مجموعه پارتو قابل کنترل است. در روش محدودیت اپسیلون تکامل یافته، مطابق با روش اصلی محدودیت اپسیلون یکی از اهداف مسئله با توجه به اولویت تصمیم‌گیرنده بهینه می‌شود و سایر اهداف به کران بالای اپسیلون محدود می‌شوند. مدل به دست آمده به صورت زیر است:

$$\left\{ \begin{array}{l} \text{Max } F_1(x) - \delta \times \left[\frac{S_2}{r_2} + \left(10^{-1} \times \frac{S_3}{r_3} \right) + \dots + \left(10^{-(n-2)} \times \frac{S_n}{r_n} \right) \right] \\ \text{s. t:} \\ F_i(x) + s_i = e_i, \quad i = 2, 3, \dots, n \\ x \in S, s_i \in R^+ \end{array} \right. \quad (48)$$

جایی که S منطقه جواب مدل است. e_i مقدار سمت راست توابع اهداف و δ یک عدد کوچک است (معمولاً $\delta \in [10^{-6}, 10^{-3}]$). r_i دامنه تابع هدف F_i (طبق محاسبات جدول موازنه) است. در این مدل، نوعی بهینه‌سازی لکسیوگرافی برای بی‌مقیاس‌سازی و اطمینان از وجود گزینه بهینه دیگری در بقیه توابع هدف، در عبارت دوم تابع هدف گنجانده شده است (ماوروتاس^۳، ۲۰۱۳). به عنوان مثال، با این فرمول حل کننده بهترین حالت را برای F_1 پیدا می‌کند و سپس سعی دارد به ترتیب سایر اهداف را بهینه کند.

۴. یافته‌های تحقیق

در این بخش، یک مثال عددی برای حل مدل ریاضی ارائه شده در بخش قبل، در نظر گرفته می‌شود. مثال عددی دارای پنج تأمین‌کننده، شش تولیدکننده، چهار توزیع‌کننده، هشت مشتری، چهار مرکز جمع‌آوری، شش مرکز بازیافت، و چهار دوره زمانی است. سایر پارامترهای مثال آزمایشی به طور تصادفی از طریق تابع توزیع یکنواخت تولید شده‌اند.

در مسائل چندهدفه عملاً توابع هدف نمی‌توانند بدون بدتر شدن حداقل یکی از توابع دیگر بهینه باقی بمانند (پریرا^۳ و همکاران، ۲۰۲۱). برای پی بردن به وجود تعارض میان اهداف، ابتدا باید ماتریس پی‌آمد را برای اهداف تشکیل داد. به همین منظور، با بهینه‌سازی هر یک از اهداف مسئله به طور جداگانه و مشروط به بهینگی آن، سایر اهداف محاسبه می‌شوند. جدول ۴ نتایج بهینه‌سازی توابع سودآوری سبز (f_1)، مسئولیت‌پذیری اجتماعی (f_2)، و قابلیت اطمینان (f_3) را برای مثال عددی به نمایش گذاشته است. نتایج جدول

1 Mavrotas

2 Augmented Epsilon Constraint (AEC)

3 Pereira



۴ نشان می‌دهد که بهینه‌سازی تک هدفه هر تابع هدف منجر به نتایج خوبی برای آن تابع هدف و نتایج نامناسب برای سایر توابع هدف می‌شود. به عنوان مثال، $f2 = 1282.13$ به دست آمده از بهینه‌سازی تک هدفه $f3$ ، 0.27 کمتر از $f2 = 1756.73$ به دست آمده از بهینه‌سازی تک هدفه $f2$ است. به عنوان مثال دیگر، $f3 = 2.96$ به دست آمده از بهینه‌سازی تک هدفه $f1$ ، 0.4 کمتر از $f3 = 4.91$ به دست آمده از بهینه‌سازی تک هدفه $f3$ است. بنابراین، بهینه‌سازی تک هدفه نمی‌تواند مصالحه مناسبی را در میان توابع هدف رقیب فراهم کند، که نیاز بهینه‌سازی چند هدفه را برای مسئله طراحی شبکه زنجیره تأمین نشان می‌دهد.

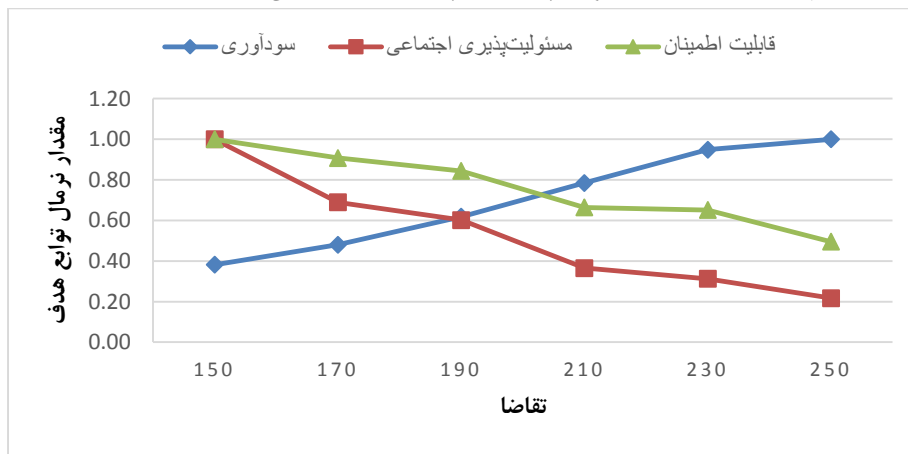
جدول ۴. ماتریس پی‌آمد اهداف برای مسئله اندازه کوچک

پی‌آمد	هدف اول	هدف دوم	هدف سوم
بهینه‌سازی سودآوری ($f1$)	۱۴۴۶۵۳۷۲,۱۸	۱۵۳۱,۸۴	۲,۹۶
بهینه‌سازی مسئولیت‌پذیری اجتماعی ($f2$)	۱۳۹۱۶۵۲۷,۰۴	۱۷۵۶,۷۳	۴,۲۴
بهینه‌سازی قابلیت اطمینان ($f3$)	۱۲۲۹۶۰۲۴,۹۵	۱۲۸۲,۱۳	۴,۹۱

به طور کلی، می‌توان گفت سه هدف در نظر گرفته شده در مدل این مقاله، یعنی سود اقتصادی، مسئولیت‌پذیری اجتماعی، و قابلیت اطمینان تعارض دارند. از نظر اقتصادی، اخذ قرارداد تأمین مواد اولیه با تأمین‌کننده با قیمت پایین‌تر می‌تواند هزینه خرید را به حداقل رساند، اما ممکن است این تأمین‌کننده در فاصله دورتری از کارخانه قرار داشته باشد، این مسافت بیشتر منجر به انتشار بیشتر کربن و همچنین هزینه انتشار کربن می‌شود. برای هدف قابلیت اطمینان، انتخاب تأمین‌کننده نزدیک، می‌تواند هزینه انتشار کربن را به حداقل برساند، اما قابلیت اطمینان آن بواسطه دسترسی کمتر به منابع انرژی (تأمین‌کننده‌های دورتر به این منابع نزدیک‌ترند) کمتر می‌شود و همچنین قیمت خرید مواد ممکن است بالاتر از قیمت تعیین شده توسط سایر تأمین‌کنندگان باشد. در این شرایط، تصمیم‌گیرندگان باید بین جواب‌های سه هدف مبادله کنند.

۴-۱. تحلیل حساسیت مدل

به منظور اعتبارسنجی و بررسی دقیق‌تر رفتار مدل پیشنهادی می‌توان حساسیت پارامترها را نسبت به تغییر مقدارشان مورد مشاهده قرار داد. از این رو، در این بخش سعی می‌شود با تغییر تقاضای بازار اولیه (DEM_{er}^t)، رفتار توابع هدف سه گانه‌ی مدل یعنی سودآوری، مسئولیت‌پذیری اجتماعی و قابلیت اطمینان بررسی گردد. تغییر مقدار توابع هدف سودآوری، مسئولیت‌پذیری اجتماعی و قابلیت اطمینان نسبت به تغییر پارامتر تقاضای بازار اولیه (DEM_{er}^t) در شکل ۲ نشان داده شده است.





شکل ۲. تحلیل حساسیت توابع هدف نسبت به تغییرات تقاضا

همان‌طور که در نمودار مشاهده می‌شود با افزایش تقاضای بازار اولیه در مسئله مقدار تابع هدف سودآوری افزایش، اما مقدار توابع هدف مسئولیت‌پذیری اجتماعی و قابلیت اطمینان کاهش می‌یابد. با توجه به وجود هزینه جریمه برای مواقع کمبود، مدل سعی در ارضای حداکثری تقاضا دارد. استراتژی عملیاتی مدیریت تولید هنگام مواجهه با افزایش ناگهانی تقاضای مشتریان، افزایش میزان تولید است. این استراتژی در مدل ریاضی به واسطه وجود رابطه ضرب میان قیمت فروش محصولات و هزینه‌های تولید (پارامتر) با مقدار تولید (متغیر تصمیم) در تابع هدف سودآوری قابل بیان است. اگرچه مسئولیت‌پذیری اجتماعی زنجیره تأمین در مدل پیشنهادی به مقدار تولید (متغیر تصمیم) وابسته است، اما میزان این وابستگی در جهت منفی عمل می‌کند. از یک سو، افزایش مقدار تولید به عنوان یک برنامه عملیاتی برای مقابله با افزایش تقاضا به ندرت به استخدام نیروی جدید (که نیازمند برنامه‌ریزی بلندمدت است) می‌انجامد و اغلب با فشرده‌سازی زمان کاری کارکنان موجود جبران می‌شود. از سوی دیگر، افزایش ساعات کاری کارکنان به منظور استفاده حداکثری از ظرفیت اسمی تولید منجر به افزایش مرخصی‌های استعلاجی استفاده شده توسط پرسنل تولیدی می‌شود. بنابراین، افزایش تقاضا به کاهش مسئولیت‌پذیری اجتماعی منتهی می‌شود. یک روی دیگر سکه افزایش تقاضا، میزان تأثیرپذیری قابلیت اطمینان زنجیره تأمین پیشنهادی از این افزایش است. واکنش معکوس مدل از دیدگاه قابلیت اطمینان در پاسخ به تقاضای افزایش‌یافته مشتریان، به خوبی در شکل ۲ نمایان است. در توضیح این واکنش می‌توان گفت که افزایش میزان تولید در پاسخ به افزایش تقاضا، مواد اولیه بیشتری می‌خواهد. تأمین میزان بیشتری از مواد اولیه، انعقاد قرارداد با تأمین‌کنندگان با قابلیت اطمینان کمتر را اجتناب‌ناپذیر می‌سازد. زیرا ظرفیت تأمین‌کنندگان محدود است و هیچ‌یک به تنهایی قادر به تأمین نیازهای زنجیره تأمین در شرایط عادی نیست. این محدودیت در حالت افزایش تقاضا تشدید می‌شود. در واقع، برای زنجیره تأمین طراحی شده، رضایت مشتری مهمتر از قابلیت اطمینان است.

۵. بحث و نتیجه‌گیری

در این تحقیق به طراحی و ارائه یک مدل ریاضی طراحی شبکه زنجیره تأمین حلقه بسته پرداخته شده است که شامل ملاحظات پایداری و قابلیت اطمینان، مسئولیت‌پذیری اجتماعی و سود اقتصادی می‌باشد. یک مدل برنامه‌ریزی ریاضی عدد صحیح مختلط غیرخطی برای مسئله طراحی شبکه زنجیره تأمین به صورت سه هدفه، چندمحصولی، چندسطحی، چندمنبعی، چندظرفیتی و چندمرحله‌ای طراحی گردید. از آنجا که مدل ریاضی به صورت مدل بهینه‌سازی چندهدفه می‌باشد برای حل آن لازم است از روش‌های مناسب بهینه‌سازی چندهدفه استفاده شود. به همین دلیل برای حل مدل ریاضی روش محدودیت افسیلون تقویت شده (AEC) در نرم‌افزار گمز توسعه داده شد. همچنین یک مثال عددی با داده‌های تصادفی در ابعاد مختلف برای سنجش صحت و عملکرد کلی مدل پیشنهادی در نظر گرفته شده است.

برای اعتبارسنجی مدل بهینه‌سازی طراحی شده به تحلیل حساسیت عددی پارامتر تقاضا پرداختیم و نتایج آن ارائه گردید. مشاهده شد که با افزایش پارامتر تقاضا مقدار سود مسئله نیز افزایش می‌یابد در حالی که قابلیت اطمینان و مسئولیت‌پذیری اجتماعی کاهش پیدا می‌کند. با افزایش پارامتر جریمه مقدار تابع هدف سود، قابلیت اطمینان و مسئولیت‌پذیری اجتماعی کاهش پیدا می‌کند. زمانی که پارامتر ظرفیت تأمین‌کننده افزایش می‌یابد سود مسئله و قابلیت اطمینان زیاد می‌شود در حالی که مسئولیت‌پذیری اجتماعی ثابت می‌ماند. در نهایت با افزایش پارامتر انتشار گازهای گلخانه‌ای مقدار تابع هدف سود و مسئولیت‌پذیری اجتماعی کاهش پیدا می‌کند در حالی که مقدار تابع هدف قابلیت اطمینان تقریباً ثابت می‌ماند.



برای پژوهش‌های آتی می‌توان به ارائه پیشنهادهای در جهت بهبود تحقیق حاضر پرداخت. برای مثال می‌توان برای حل مسئله طراحی شده رویکردهای فراابتکاری قوی مانند بهینه‌سازی ازدحام ذرات و رقابت استعماری چند هدفه را به کار برد و نتایج حل مسئله با روش‌های مختلف را با یکدیگر مقایسه کرد. همچنین می‌توان مبحث مسیریابی وسایل نقلیه و یا لیفتراک‌های مراکز تولیدی را در مسئله مدل‌سازی نمود. علاوه بر این می‌توان از عدم قطعیت داده‌ها در مورد پارمترهایی مانند تقاضا استفاده نمود و شرایط مسئله را به شرایط دنیای واقعی نزدیک‌تر نمود.

تشکر و قدردانی

نویسندگان مایلند از کارشناسان سازمان حفاظت از محیط زیست ایران به خاطر ارائه اطلاعات مفید در مورد برنامه نقشه راه محیطی با هدف تعامل بین‌المللی که کیفیت پژوهش را بهبود بخشید، تشکر کنند.

منابع

- اسکندری‌ثانی، محمد و سفالگر، سحر (۱۴۰۱)، ادغام اقتصاد سبز و چرخشی، رویکرد نوین درآمد پایدار در شهر بیرجند. نشریه مدیریت سبز و توسعه، ۱ (۲)، ص ۱۵۹-۱۷۲. <https://doi.org/10.22077/jgmd.2023.6171.1023>
- امیریان، سجاد، امیری، مقصود و تقوی فرد، محمدتقی (۱۴۰۲)، ادغام پایداری و قابلیت اطمینان در زنجیره تأمین: مرور سیستماتیک ادبیات. نشریه علمی مدیریت زنجیره تأمین، ۲۵ (۷۸)، ص ۱-۲۸. <https://dorl.net/dor/20.1001.1.20089198.1402.25.79.8.2>
- پاشایی، پارسا، شاطری، مفید و اشرفی، علی (۱۴۰۱)، تحلیل پروژه‌های محیط زیستی اجرا شده در شرکت پالایشگاه گاز فجر جم. نشریه مدیریت سبز و توسعه، ۱ (۲)، ص ۱۳-۲۶. <https://doi.org/10.22077/jgmd.2023.6102.1019>
- Ahi, P., & Searcy, C. (2015). An analysis of metrics used to measure performance in green and sustainable supply chains. *Journal of cleaner production*, 86, 360-377. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2014.08.005>
- Amin, S. H., & Zhang, G. (2013). A multi-objective facility location model for closed-loop supply chain network under uncertain demand and return. *Applied Mathematical Modelling*, 37(6), 4165-4176. <https://doi.org/10.1016/j.apm.2012.09.039>
- Amirian, S., Amiri, M., & Taghavifard, M. T. (2022a). The Emergence of a Sustainable and Reliable Supply Chain Paradigm in Supply Chain Network Design. *Complexity*, 2022. <https://doi.org/10.1155/2022/9415465>
- Amirian, S., Amiri, M., & Taghavifard, M. T. (2022b). Sustainable and reliable closed-loop supply chain network design: Normalized Normal Constraint (NNC) method application. *Journal of Industrial and Systems Engineering*, 14(3), 33-68. <https://dorl.net/dor/20.1001.1.17358272.2022.14.3.2.1>
- Athikulrat, K., Rungreanganun, V., & Talabgaew, S. (2015). Reliability assessment on member of supply chain based on SCOR performance and fault tree analysis. *International Journal of Computer Science and Electronics Engineering*, 3(2), 107-111. <https://dokumen.tips/documents/reliability-assessment-on-member-of-supply-chain-based-on-are-essential-for.html>
- Barros, R. D. C., Sampaio, M., & Correa, J. S. (2019). Impact of the inclusion of variable CO 2 cost in the distribution network design. *Production*, 29. <https://doi.org/10.1590/0103-6513.20190065>
- Basu, D., & Lee, M. (2022). A combined sustainability-reliability approach in geotechnical engineering. In *Risk, Reliability and Sustainable Remediation in the Field of Civil and Environmental Engineering* (pp. 379-413). Elsevier. <http://dx.doi.org/10.1016/B978-0-323-85698-0.00029-0>



- Chopra, S., & Meindl, P. (2007). Supply chain management. Strategy, planning & operation. In Das summa summarum des management (pp. 265-275). Gabler. https://doi.org/10.1007/978-3-8349-9320-5_22
- Esmizadeh, Y., & Mellat Parast, M. (2021). Logistics and supply chain network designs: incorporating competitive priorities and disruption risk management perspectives. *International Journal of Logistics Research and Applications*, 24(2), 174-197. <https://doi.org/10.1080/13675567.2020.1744546>
- Fazli-Khalaf, M., Naderi, B., Mohammadi, M., & Pishvae, M. S. (2020). Design of a sustainable and reliable hydrogen supply chain network under mixed uncertainties: A case study. *International Journal of Hydrogen Energy*, 45(59), pp. 34503-34531. <http://dx.doi.org/10.1016/j.ijhydene.2020.05.276>
- Foong, S. Z., & Ng, D. K. (2022). A systematic approach for synthesis and optimisation of sustainable oil palm value chain (OPVC). *South African Journal of Chemical Engineering*, 41, 65-78. <https://discovery.researcher.life/article/a-systematic-approach-for-synthesis-and-optimisation-of-sustainable-oil-palm-value-chain-opvc/9f21db8ddbd732879d590f2c871eb5d5>
- Galaitsi, S. E., Keisler, J. M., Trump, B. D., & Linkov, I. (2021). The need to reconcile concepts that characterize systems facing threats. *Risk Analysis*, 41(1), 3-15. <https://doi.org/10.1111/risa.13577>
- Gao, Y., Li, J., & Song, Y. (2009, August). Performance evaluation of green supply chain management based on membership conversion algorithm. In 2009 ISECS international colloquium on computing, communication, control, and management (Vol. 3, pp. 237-240). IEEE. <https://doi.org/10.1109/CCCM.2009.5267895>
- Ghayebloo, S., Tarokh, M. J., Venkatadri, U., & Diallo, C. (2015). Developing a bi-objective model of the closed-loop supply chain network with green supplier selection and disassembly of products: the impact of parts reliability and product greenness on the recovery network. *Journal of Manufacturing Systems*, 36, 76-86. <http://dx.doi.org/10.1016/j.jmsy.2015.02.011>
- Giunipero, L. C., & Eltantawy, R. A. (2004). Securing the upstream supply chain: a risk management approach. *International Journal of Physical Distribution & Logistics Management*. 34(9), 698-713 <http://dx.doi.org/10.1108/09600030410567478>
- Gottberg, A., Morris, J., Pollard, S., Mark-Herbert, C., & Cook, M. (2006). Producer responsibility, waste minimisation and the WEEE Directive: Case studies in eco-design from the European lighting sector. *Science of the total environment*, 359(1-3), 38-56. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2005.07.001>
- Goudarzi, Z., Seifbarghy, M., & Pishva, D. (2022). Bi-objective modeling of a closed-loop multistage supply chain considering the joint assembly center and reliability of the whole chain. *Journal of Industrial and Production Engineering*, 39(3), 230-252. <http://dx.doi.org/10.1080/21681015.2021.1974109>
- Govindan, K., Fattahi, M., & Keyvanshokoo, E. (2017). Supply chain network design under uncertainty: A comprehensive review and future research directions. *European Journal of Operational Research*, 263(1), pp.108-141. <https://doi.org/10.1016/j.ejor.2017.04.009>
- Govindan, K., Mina, H., & Alavi, B. (2020). A decision support system for demand management in healthcare supply chains considering the epidemic outbreaks: A case study of coronavirus disease 2019 (COVID-19). *Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review*, 138, 101967. <https://doi.org/10.1016/j.tre.2020.101967>
- Grishko, A., Adnreev, P., Goryachev, N., Trusov, V., & Danilova, E. (2018, May). Reliability control of complex systems at different stages of their life cycle. In 2018 Ural Symposium on Biomedical



- Engineering, Radioelectronics and Information Technology (USBREIT) (pp. 220-223). IEEE. <http://dx.doi.org/10.1109/USBREIT.2018.8384589>
- Hagspiel, V., Huisman, K. J., & Kort, P. M. (2016). Volume flexibility and capacity investment under demand uncertainty. *International Journal of Production Economics*, 178, 95-108. <https://doi.org/10.1016/j.ijpe.2016.05.007>
 - Hwang, C. L., & Masud, A. S. M. (2012). *Multiple objective decision making—methods and applications: a state-of-the-art survey* (Vol. 164). Springer Science & Business Media. <https://link.springer.com/book/10.1007/978-3-642-45511-7>
 - Kabadurmus, O., & Erdogan, M. S. (2020). Sustainable, multimodal and reliable supply chain design. *Annals of Operations Research*, 292(1), pp. 47-70. <https://link.springer.com/article/10.1007/s10479-020-03654-0>
 - Kamalahmadi, M., & Mellat-Parast, M. (2016). Developing a resilient supply chain through supplier flexibility and reliability assessment. *International Journal of Production Research*, 54(1), 302-321. <http://dx.doi.org/10.1080/00207543.2015.1088971>
 - Khalifehzadeh, S., Seifbarghy, M., & Naderi, B. (2015). A four-echelon supply chain network design with shortage: Mathematical modeling and solution methods. *Journal of Manufacturing Systems*, 35, 164-175. <https://doi.org/10.1016/j.jmsy.2014.12.002>
 - Khan, S. A. R., Zkik, K., Belhadi, A., & Kamble, S. S. (2021). Evaluating barriers and solutions for social sustainability adoption in multi-tier supply chains. *International Journal of Production Research*, 59(11), 3378-3397. <https://doi.org/10.1080/00207543.2021.1876271>
 - Kleverlaan, M. P. (2008). Supply chain performance. https://www.researchgate.net/publication/277162194_Supply_chain_performance
 - Li, Q., Loy-Benitez, J., Nam, K., Hwangbo, S., Rashidi, J., & Yoo, C. (2019). Sustainable and reliable design of reverse osmosis desalination with hybrid renewable energy systems through supply chain forecasting using recurrent neural networks. *Energy*, Vol. 178, pp. 277-292. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2019.04.114>
 - Marchi, B., Zanoni, S., Zavanella, L. E., & Jaber, M. Y. (2019). Supply chain models with greenhouse gases emissions, energy usage, imperfect process under different coordination decisions. *International Journal of Production Economics*, Vol. 211, pp. 145-153. <https://doi.org/10.1016/j.ijpe.2019.01.017>
 - Mavrotas, G. (2009). Effective implementation of the ϵ -constraint method in multi-objective mathematical programming problems. *Applied mathematics and computation*, 213(2), pp. 455-465. <https://doi.org/10.1016/j.amc.2009.03.037>
 - Mavrotas, G., & Florios, K. (2013). An improved version of the augmented ϵ -constraint method (AUGMECON2) for finding the exact pareto set in multi-objective integer programming problems. *Applied Mathematics and Computation*, 219(18), 9652-9669. <https://doi.org/10.1016/j.amc.2013.03.002>
 - Miao, X., Yu, B., & Xi, B. (2009). The uncertainty evaluation method of supply chain reliability. *Transport*, 24(4), 296-300. <https://doi.org/10.3846/1648-4142.2009.24.296-300>
 - Nosrati, M., & Khamseh, A. (2020). Reliability optimization in a four-echelon green closed-loop supply chain network considering stochastic demand and carbon price. *Uncertain Supply Chain Management*, 8(3), pp.457-472. <http://dx.doi.org/10.5267/j.uscm.2020.5.002>
 - Nurjanni, K. P., Carvalho, M. S., & Costa, L. (2017). Green supply chain design: A mathematical modeling approach based on a multi-objective optimization model. *International Journal of Production Economics*, Vol. 183, pp. 421-432. <https://doi.org/10.1016/j.ijpe.2016.08.028>



- Ohmori, S., & Yoshimoto, K. (2013). A framework of managing supply chain disruption risks using network reliability. *Industrial engineering and management systems*, 12(2), 103-111. <http://dx.doi.org/10.7232/iems.2013.12.2.103>
- Okwu, M. O., & Tartibu, L. K. (2020). Sustainable supplier selection in the retail industry: A TOPSIS-and ANFIS-based evaluating methodology. *International journal of engineering business management*, 12, 1847979019899542. <http://dx.doi.org/10.1177/1847979019899542>
- Pagell, M., & Wu, Z. (2009). Building a more complete theory of sustainable supply chain management using case studies of 10 exemplars. *Journal of supply chain management*, 45(2), 37-56. <https://doi.org/10.1111/j.1745-493X.2009.03162.x>
- Pereira, J. L. J., Oliver, G. A., Francisco, M. B., Cunha, S. S., & Gomes, G. F. (2021). A review of multi-objective optimization: methods and algorithms in mechanical engineering problems. *Archives of Computational Methods in Engineering*, 1-24. <https://doi.org/10.1007/s11831-021-09663-x>
- Psarommatis, F., & May, G. (2022). A standardized approach for measuring the performance and flexibility of digital twins. *International Journal of Production Research*, 1-16. <http://dx.doi.org/10.1080/00207543.2022.2139005>
- Rahmani, D., & Mahoodian, V. (2017). Strategic and operational supply chain network design to reduce carbon emission considering reliability and robustness. *Journal of Cleaner Production*, 149, 607-620. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2017.02.068>
- Samuel, C. N., Diallo, C., Venkatadri, U., & Ghayebloo, S. (2021). Multicomponent multiproduct closed-loop supply chain design with transshipment and economies of scale considerations. *Computers & Industrial Engineering*, 153, 107073. <http://dx.doi.org/10.1016/j.cie.2020.107073>
- Sheffi, Y. (2007). *The resilient enterprise: overcoming vulnerability for competitive advantage*. Pearson Education India. <https://mitpress.mit.edu/9780262693493/the-resilient-enterprise/>
- Singh, S., Kumar, R., Panchal, R., & Tiwari, M. K. (2021). Impact of COVID-19 on logistics systems and disruptions in food supply chain. *International journal of production research*, 59(7), 1993-2008. <https://doi.org/10.1080/00207543.2020.1792000>
- Smith, D. J. (2021). *Reliability, maintainability and risk: practical methods for engineers*. Butterworth-Heinemann. <https://www.amazon.com/Reliability-Maintainability-Risk-Practical-Engineers/dp/0323912613>
- Tirkolaee, E. B., Goli, A., Faridnia, A., Soltani, M., & Weber, G. W. (2020). Multi-objective optimization for the reliable pollution-routing problem with cross-dock selection using Pareto-based algorithms. *Journal of Cleaner Production*, 276, 122927. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.122927>
- Vishnu, C. R., Sridharan, R., Gunasekaran, A., & Kumar, P. R. (2019). Strategic capabilities for managing risks in supply chains: current state and research futurities. *Journal of Advances in Management Research*, 17(2), 173-211. <https://doi.org/10.1108/JAMR-04-2019-0061>
- Wang, R., Ke, C., & Cui, S. (2022). Product price, quality, and service decisions under consumer choice models. *Manufacturing & Service Operations Management*, 24(1), 430-447. <http://dx.doi.org/10.1287/msom.2020.0947>