

# بهینه سازی استوار چند هدفه زنجیره تأمین حلقه بسته سبز در شرایط عدم قطعیت (مطالعه موردی: نان صنعتی)

مونا کریمی\* (کارشناس ارشد)

دانشکده مدیریت و حسابداری، پردیس فارابی دانشگاه تهران

بابک جوادی (استادیار)

دانشکده مهندسی صنایع، پردیس فارابی دانشگاه تهران

میثم شهبازی (استادیار)

دانشکده مدیریت و حسابداری، پردیس فارابی دانشگاه تهران

مهندسی صنایع و مدیریت شریف، زمستان ۱۴۰۲ (۵۱-۶۳)، پژوهشی  
دوری ۳۹، شماره ۲، صص.

اتلاف منابع یکی از مهم ترین مسائل و چالش هایی است که کشورهای مختلف با آن روبه رو هستند. زنجیره تأمین حلقه بسته، یکی از راه های در نظر گرفتن بازیافت محصولات، برای کنترل منابع زیست محیطی است. تحقیق حاضر، به دنبال توسعه یک رویکرد برنامه ریزی استوار برای طراحی شبکه زنجیره تأمین حلقه بسته نان صنعتی در شرایط عدم قطعیت با در نظر گرفتن اهداف اقتصادی و زیست محیطی است. بدین منظور، یک مدل برنامه ریزی خطی عدد صحیح مختلط چندهدفه تک محصولی، تک دوره ای و چند ظرفیتی ارائه می شود. بین اهداف با روش تریبی و هسینی (TH)، توازن برقرار شده و مدل در اندازه های مختلف و با عدم قطعیت های متفاوت آزمایش می شود. نتایج حاصل از میانگین توابع هدف نشان می دهد که در همه موارد، حالت استوار جواب های بهتر و کارآمدتری نسبت به جواب های قطعی دارد. شکاف بین دو رویکرد در اغلب موارد و با توجه به هر دو ضریب عملکرد، براساس اندازه و عدم قطعیت مسئله، افزایش می یابد.

واژگان کلیدی: بهینه سازی استوار، زنجیره تأمین حلقه بسته سبز، عدم قطعیت، نان صنعتی.

## ۱. مقدمه

در کشور، به صورت ضایعات از چرخه مصرف مستقیم انسان خارج می شود [۵] و سالانه ۳۰۰ میلیون دلار از گندم های تولیدی و وارداتی ضایع می شود. [۶] قسمت اعظم ضایعات نان، در مرحله مصرف ایجاد می شود. [۷] در ایران تقریباً بیشتر ضایعات نان به عنوان خوراک دام استفاده می شود. [۲] به همین دلیل، برخی تصور می کنند که ضایعات نان را نباید ضایعات تلقی کرد. با این حال، در دراز مدت، ضایعات نان می تواند باعث اختلالات تغذیه ای در دام شود. همچنین، به دلیل آلودگی قارچی و تولید آفلاتوکسین، یک عامل سرطان زا، مصرف ضایعات نان برای دام و انسان خطرناک است. [۲] علاوه بر این، تنها درصد کمی از ضایعات نان جمع آوری می شود و بقیه در زباله ها ریخته می شوند. [۷] بنابراین، کنترل بهداشتی و زیست محیطی ضایعات نان و فرآورده های حاصل از آن ضروری است تا خطرات میکروبی در هنگام بازیافت و استفاده مجدد نان کاهش یابد. [۶] جنبه

از جمله مهم ترین مسائل و چالش هایی که کشورهای مختلف، از جمله کشور ما، با آن روبه رو هستند، اتلاف منابع است. گزارش های سازمان خواروبار ملل متحد (FAO) نشان می دهد که سالانه در جهان حدود ۳۰ درصد از مواد غذایی تولید شده هدر رفته و به ضایعات تبدیل می شود. [۱] از میزان ضایعات مواد غذایی سالانه جهان که بالغ بر ۱/۳ میلیارد تن است، سهم ایران ۲/۷ درصد است. [۲] در خصوص نان، این امر چشم گیرتر است. از آنجا که نان ارزان ترین ماده مصرفی خانوارها است، اصلی ترین ماده غذایی در سبد خانواده های ایرانی به ویژه دهک های کم درآمد محسوب می شود. [۳] کشور ما با سرانه مصرف ۱۸۰ الی ۲۰۰ کیلوگرم نان، یکی از پرمصرف ترین کشورهای جهان است. [۴] در سال های اخیر، گاهی تا ۳۰ درصد نان

\* نویسنده مسئول

تاریخ: دریافت ۱۴۰۰/۱۲/۲۲، اصلاحیه ۱۴۰۱/۸/۲۴، پذیرش ۱۴۰۱/۹/۲۱.

استاد به این مقاله:

کریمی، مونا، جوادی، بابک، و شهبازی، میثم، ۱۴۰۲. بهینه سازی استوار چند هدفه زنجیره تأمین حلقه بسته سبز در شرایط عدم قطعیت (مطالعه موردی: نان صنعتی). مهندسی صنایع و مدیریت شریف، ۳۹(۲)، صص. ۵۱-۶۴. DOI:10.24200/J65.2022.59005.2253

صنایع و مدیریت شریف، ۳۹(۲)، صص. ۵۱-۶۴. DOI:10.24200/J65.2022.59005.2253

زیست محیطی پایداری زنجیره تأمین به استراتژی‌های خرید، تولید و تعمیر، بازیافت و نوع حمل و نقل در زنجیره تأمین بستگی دارد. هدف اکثر شرکت‌های فعلی، توسعه شبکه زنجیره تأمین و تغییر طراحی محصول از طریق استفاده مجدد، بازیافت، تولید مجدد و انهدام است. این امر باعث می‌شود که زنجیره تأمین برای محیط کم‌خطرتر، کم‌مصرف‌تر و به طور کلی سبزتر باشد.<sup>[۸]</sup> کاهش میزان پسماند و بازیافت آن به نوبه خود به معنای کاهش هزینه‌های تولید و پیشگیری از اتلاف مواد اولیه است.<sup>[۶]</sup> اگر ضایعات نان وجد نداشته باشد، نیازی به واردات گندم نبوده و در بودجه دولت صرفه‌جویی می‌شود.<sup>[۴]</sup> متأسفانه، ایران یکی از معدود کشورهایی است که با مشکل ضایعات نان روبه‌رو است. کشورهای دیگر، این مسئله را در مراحل اولیه تولید غلات و سپس تهیه آرد و نان رفع نموده‌اند.<sup>[۶]</sup> از نظر اقتصادی، ضایعات تأثیر مستقیم منفی بر درآمد کشاورزان و مصرف‌کنندگان دارد و نشان‌دهنده یک سرمایه‌گذاری هدر رفته است. از آنجایی که در کشور ما دولت بابت هر عدد نان مصرفی یارانه پرداخت می‌کند، اجرای طرح‌های اصلاح فرایند تولید و عرضه نان می‌تواند ضایعات نان را کاهش دهد.<sup>[۹]</sup>

یکی از موضوع‌های مورد علاقه پژوهشگران در طی یک دهه گذشته، طراحی و برنامه‌ریزی زنجیره تأمین حلقه بسته و سیستم‌های بازیابی محصولات است. زنجیره تأمین حلقه بسته، هر دو زنجیره تأمین مستقیم و معکوس را شامل می‌شود. زنجیره تأمین مستقیم به شبکه‌ای از تسهیلات تولیدی و امکانات توزیع مربوط می‌شود که وظیفه آن تأمین مواد محصولات و توزیع آنها میان مشتریان است. زنجیره تأمین معکوس نیز به جریان محصولات استفاده شده یا فروخته نشده از مشتریان به زنجیره تأمین بالاسری برای تولید مجدد، تعمیر، بازیافت، استفاده مجدد و یا انهدام اشاره می‌کند.<sup>[۱۰]</sup> بسیاری از شرکت‌ها دریافته‌اند که تلفیق فعالیت‌های لجستیک معکوس در زنجیره تأمین با هدف بازیافت محصولات، می‌تواند موجب کاهش اثرات زیست محیطی، کاهش هزینه، افزایش بهره‌وری و تغییرات عمده در ساختار زنجیره تأمین شرکت‌ها گردد. کارایی هر دو زنجیره رو به جلو و معکوس به شدت با یکدیگر در ارتباط است. عملکرد هر زنجیره بر زنجیره دیگر و بر کل زنجیره تأمین اثر می‌گذارد. به منظور اجتناب از طراحی جداگانه زنجیره‌های تأمین رو به جلو و معکوس، استفاده از یکپارچه‌سازی مناسب که قادر به حفاظت از هر دو جریان رو به جلو و معکوس می‌باشد، امری ضروری و مهم است.<sup>[۱۱]</sup>

گالبریت، عدم قطعیت را تفاوت و فاصله بین مقدار اطلاعات لازم برای انجام کاری و مقدار اطلاعات موجود تعریف می‌کند. براساس این تعریف، عدم قطعیت بار منفی یا مثبت ندارد و می‌تواند شانس به دست آوردن منافع یا از دست دادن منافع و ضرر کردن باشد.<sup>[۱۲]</sup> عدم قطعیت به دو دسته تقسیم‌بندی شده است: انعطاف‌پذیری در اهداف و محدودیت‌ها و عدم قطعیت در داده‌ها که خود به دو نوع تقسیم می‌شود<sup>[۱۳]</sup> که عبارتند از عدم قطعیت تصادفی و عدم قطعیت معرفتی.<sup>۱</sup> بهینه‌سازی استوار، به‌عنوان یک جایگزین قوی می‌تواند عدم قطعیت را در شکل مجموعه عدم قطعیت‌های کران‌دار مدل‌سازی کند. در این تئوری، پارامترها به صورت سناریوهای گسسته و یا در یک دامنه پیوسته تعریف می‌شوند. هدف این تئوری، به دست آوردن جواب بهینه است که تقریباً نسبت به تمام پارامترهای عدم قطعیت حساسیت نداشته باشد.

هدف اصلی این پژوهش، طراحی و بهینه‌سازی استوار یک مدل زنجیره تأمین حلقه بسته در صنعت نان با در نظر گرفتن دو هدف حداقل کردن هزینه کل و حداقل کردن اثرات نامطلوب زیست محیطی در شرایط عدم قطعیت است. این تحقیق، یک طراحی شبکه لجستیک پیشرو/معکوس یکپارچه شامل تولیدکنندگان، مراکز توزیع، مراکز جمع‌آوری/بازرسی و مناطق مشتری را ارائه می‌دهد. در جریان انتقال،

محصولات جدید (نان) از تولیدکنندگان به مراکز توزیع و از مراکز توزیع به مناطق مشتری ارسال می‌شود. مراکز جمع‌آوری/بازرسی فقط در کانال معکوس استفاده می‌شوند و فعالیت‌هایی مانند بررسی و مرتب‌سازی را انجام می‌دهند. پس از آزمایش محصولات برگشتی در مراکز جمع‌آوری/بازرسی، محصولات قابل بازیافت برای فعالیت‌های تولید مجدد به تولیدکنندگان بازگردانده می‌شوند و محصولات اسقاط شده به مراکز دفع ارسال می‌شوند. مراکز دفع صنعت نان می‌تواند دامپرووری باشد. از این رو، یک مدل ریاضی برنامه‌ریزی خطی عدد صحیح مختلط<sup>۲</sup> چندهدفه شامل حداقل‌سازی هزینه‌ها و اثرات نامطلوب زیست محیطی برای طراحی شبکه زنجیره تأمین حلقه بسته با رویکرد بهینه‌سازی استوار ارائه شده است. همچنین، برای ارزیابی اثرات نامطلوب زیست محیطی، از روش Eco-indicator ۹۹ استفاده شده است. علاوه بر آن، مسئله با استفاده از روش ترابی و هسینی (TH)، در شرایط عدم قطعیت‌های متفاوت و در چهار سایز مختلف حل شده و نتایج حاصل از هر یک با یکدیگر مقایسه شده است.

## ۲. پیشینه تحقیق

اوسترو و همکاران، مدل شبکه زنجیره تأمین حلقه بسته چند محصولی ارائه کرده‌اند و برای حل آن از رویکرد تجزیه بندری<sup>۳</sup> استفاده کرده‌اند.<sup>[۱۴]</sup> چوینارد و همکاران، مدل برنامه‌ریزی احتمالی را برای طراحی یک شبکه لجستیک معکوس ارائه کرده‌اند.<sup>[۱۵]</sup> صبری و بیومن، مدل بهینه‌سازی با هدف حداقل‌سازی هزینه کل و حداکثرسازی سرعت و انعطاف‌پذیری ارائه داده‌اند.<sup>[۱۶]</sup> اسنیدر، شاخص استواری جدید با ترکیب دو هدف حداقل‌سازی میانگین هزینه و محدود کردن تأثیر نسبی هر سناریو معرفی کرده است.<sup>[۱۷]</sup> نتو و همکاران، مدل زنجیره تأمین حلقه بسته چند هدفه با در نظر گرفتن اهداف اقتصادی و زیست محیطی ارائه کرده‌اند.<sup>[۱۸]</sup> دهقانیان و منصور، با استفاده از الگوریتم ژنتیک، مدل بهینه‌سازی چندهدفه و چندمنظوره را به منظور بهبود شبکه پایدار لاستیک قراضه ارائه کرده‌اند.<sup>[۱۹]</sup> امین و همکاران نیز شبکه زنجیره تأمین حلقه بسته تعمیر مجدد تابر با هدف بهینه‌کردن سود کلی طراحی و بهینه‌سازی کرده‌اند.<sup>[۲۰]</sup>

تئوری برنامه‌ریزی و بهینه‌سازی استوار، روش ریسک‌گریزی را برای مقابله با عدم قطعیت فراهم می‌سازد. در این تئوری، یک راه‌حل برای یک مسئله بهینه‌سازی در صورتی استوار است که دارای استوار شدنی و بهینگی استوار باشد. استوارشدنی، بدین معنی است که راه‌حل باید برای تقریباً تمامی مقادیر ممکن پارامترهای عدم قطعیت موجه باقی بماند (استواری مدل). در بهینگی استوار، مقدار تابع هدف راه‌حل باید نزدیک به مقدار بهینه باقی بماند یا دارای حداقل انحرافات نامطلوب از مقدار بهینه برای تقریباً تمامی مقادیر ممکن پارامترهای نامطمئن باشد (استواری جواب).<sup>[۲۱]</sup> پیشوایی و همکاران، به منظور حداقل کردن هزینه کل زنجیره تأمین، مدل بهینه‌سازی استوار تک هدفه در شرایط عدم قطعیت را ارائه داده‌اند.<sup>[۲۲]</sup> ژاله‌چیان و همکاران، مدل دو مرحله‌ای شامل برنامه‌ریزی امکانی - تصادفی و تئوری بازی اصلاح شده را برای مواجهه با عدم قطعیت در مدل شبکه زنجیره تأمین حلقه بسته پایدار خود به کار برده‌اند.<sup>[۲۳]</sup> تحقیقات مختلفی، مدل برنامه‌ریزی غیرخطی برای طراحی زنجیره‌های تأمین را با در نظر گرفتن اهداف اقتصادی و زیست‌محیطی ارائه کرده‌اند.<sup>[۲۴-۲۷]</sup> شاه‌پوری و همکاران، در پژوهش خود، مدل برنامه‌ریزی زنجیره تأمین لجستیک معکوس یکپارچه با استفاده از رویکرد بهینه‌سازی استوار به منظور بهینه‌کردن سود را ارائه داده‌اند.<sup>[۲۸]</sup> شی و همکاران، مدل برنامه‌ریزی مختلط عدد صحیح

جدول ۱. خلاصه‌ای از تحقیقات پیشین.

پژوهشگران	زنجیره تأمین حلقه	تابع هدف			مدل سازی عدم قطعیت	منابع عدم قطعیت (پارامترهای نامشخص)	ویژگی های مدل						عدم قطعیت مرکب	روش حل	
		در نظر گرفته شده	تاثیرات محیطی	اهداف دیگر			رویکرد فازی	رویکرد تصادفی	مجموعه های عدم قطعیت	عملیاتی	تفاضل	عرضه			ظرفیت
Sabri & Beamon (۲۰۰۰)	*	*													Exact (small size)
Snyder & Daskin (۲۰۰۱)	*		*												P-Robust and Regret Approach
Üster et al (۲۰۰۷)	*	*													Benders Decomposition
Lieckens & Vandaele (۲۰۰۷)	*	*													Genetic Algorithm
Neto (۲۰۰۸)	*	*	*												Exact
Dehghania n & Mansour (۲۰۰۹)	*	*	*												Genetic Algorithm
Chen et al (۲۰۱۴)	*	*	*												Genetic Algorithm
Zalchian et al (۲۰۱۶)	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	Hybrid Meta-Heuristic Algorithm
d'Amore & Bezzo (۲۰۱۶)	*	*	*												Exact
Amin et al (۲۰۱۷)	*	*	*												Decision Tree-Based
Shi et al (۲۰۱۷)	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	Genetic Algorithm-NSGA II
Pant et al (۲۰۲۱)	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	Augmented epsilon method
تحقیق حاضر	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	Ben-Tal and Nemirovski Approach

فرایند مدل‌سازی زنجیره تأمین با وارد کردن گزینه‌های بازیابی و جریانات معکوس، به دلیل ویژگی‌هایی مانند عدم قطعیت در زمان، مقدار و کیفیت محصولات برگشتی، پیچیده‌تر می‌شود. همچنین، بهینه‌سازی و حل مسائل شبکه زنجیره تأمین در محیط‌های واقعی، به دلیل مقیاس بزرگ مسئله و در نتیجه پیچیدگی آن، مشکل و زمان‌بر می‌شود. در این پژوهش، پیچیدگی ساختاری (اندازه) و پیچیدگی عملکردی (مسائل عدم قطعیت) برای مسئله زنجیره تأمین حلقه بسته لحاظ شده است. از سوی دیگر، مدل‌های برنامه‌ریزی چندهدفه کمی در پژوهش‌های صورت گرفته طراحی شبکه زنجیره تأمین حلقه بسته وجود دارد که به صورت هم‌زمان چندین هدف را بررسی کند. مفهوم جواب در مباحث تصمیم‌گیری از جمله مباحث مهم برنامه‌ریزی ریاضی بوده که از اهمیت به‌سزایی برخوردار است. اهمیت این موضوع زمانی افزایش می‌یابد که مدل‌ساز بخواهد هم‌زمان چندین هدف اغلب متضاد را مورد توجه قرار دهد. بنابراین، یک مدل ریاضی چندهدفه شامل حداقل‌سازی هزینه و تأثیرات

چند هدفه برای طراحی شبکه حلقه بسته با هدف بهینه‌سازی هزینه‌های کل و انتشار کلی کربن ارائه کرده‌اند.<sup>[۲۹]</sup> حمیدیه و همکاران، مدل جدید مبتنی بر رویکرد برنامه‌ریزی احتمالی برای طراحی شبکه لجستیک حلقه بسته پایدار تک محصولی، چند متغیر و چندسطحی در شرایط عدم اطمینان ارائه داده‌اند.<sup>[۳۰]</sup> پولو و همکاران، مدل زنجیره تأمین حلقه بسته در صنعت الکترونیک را به منظور بهینه‌سازی کردن ارزش افزوده اقتصادی ارائه داده‌اند. مدل ارائه شده چندمحصولی و چند دوره‌ای، با در نظر گرفتن پارامتر تقاضا و همراه با عدم قطعیت می‌باشد.<sup>[۳۱]</sup> پنت و همکاران، مدل زنجیره تأمین حلقه بسته دوهدفه، شامل بهینه‌سازی سود و حداقل‌سازی محتوای کربن را برای صنعت کاغذ توسعه داده‌اند.<sup>[۳۲]</sup> جوزدانی و گویندان، مدل زنجیره تأمین چند محصولی و چند دوره‌ای را با در نظر گرفتن کاهش هزینه و اهداف اجتماعی گسترش داده‌اند.<sup>[۳۳]</sup> خلاصه‌ای از پژوهش‌های صورت گرفته در جدول ۱ نشان داده شده است.

محیطی برای طراحی شبکه زنجیره تأمین حلقه بسته مختلط با رویکرد بهینه‌سازی استوار ارائه می‌شود.

در این مدل، ابتدا فرض شده است که همه پارامترها به صورت قطعی بوده و اطمینان کامل وجود دارد. از آنجایی که در دنیای واقعی عدم قطعیت وجود دارد، علاوه بر پارامترهایی چون تقاضا، هزینه‌های تولید، انبارداری، حمل‌ونقل، پارامترهایی چون اثرات نامطلوب زیست محیطی حاصل از تولید، انبارداری و حمل‌ونقل، صرفه‌جویی زیست محیطی و درآمد حاصل از محصولات برگشتی نیز به صورت غیر قطعی در نظر گرفته شده‌اند. این امر، یکی از نوآوری‌های این پژوهش به شمار می‌رود. مدل، براساس روش استوار پیشوایی و همکاران که توسعه‌یافته روش بن‌تال و نیروفسکی می‌باشد، در دو شرایط قطعی و عدم قطعیت مورد بررسی قرار گرفته است. در نهایت، برای حل مدل استوار چند هدفه زنجیره تأمین حلقه بسته نان، یک رویکرد تعاملی مبتنی بر روش تریبی و هسینی در دو شرایط قطعی و عدم قطعیت (با در نظر گرفتن عدم قطعیت‌های مختلف) توسعه داده شده است.

مراکز توزیع به مناطق مشتری ارسال می‌شوند تا به تقاضای مشتری پاسخ دهند. در جریان معکوس، محصولات معیوب یا استفاده شده (هدررفت نان) از مناطق مشتری به تولیدکنندگان از طریق مراکز جمع‌آوری/بازرسی ارسال می‌شوند. مراکز جمع‌آوری/بازرسی فقط در کانال معکوس استفاده می‌شوند و فعالیت‌هایی مانند چک کردن و مرتب‌سازی را انجام می‌دهند. پس از بازگشت محصولات در مراکز جمع‌آوری/بازرسی، محصولات قابل بازیافت به تولیدکنندگان برای فعالیت‌های بازسازی ارسال شده و محصولات ضایعات به مراکز دفع ارسال می‌شوند. یکی از راه‌های دفن زباله برای صنایع نان، استفاده از نان غیر قابل بازیافت به‌عنوان غذا برای حیوانات است.

نان مصرف شده توسط مشتری جمع‌آوری می‌شود و پس از بررسی موارد قابل بازیافت، به مراکز بازیافت انتقال داده می‌شود و موارد غیرقابل استفاده به مراکز دفع (انهدام) منتقل می‌شوند. بعد از بررسی مجدد در مراکز بازیافت، نان‌های قابل بازیافت به آرد تبدیل شده و به مراکز تولید مجدد که همان مراکز تولید هستند، انتقال می‌یابند.

### ۳. روش پیشنهادی

در پژوهش حاضر، روش تحقیق از نظر نوع هدف تحقیق، کاربردی و از نظر طرح تحقیق و نحوه گردآوری داده‌ها، توصیفی و از نوع مطالعه، موردی می‌باشد. همچنین، داده‌های پژوهش حاضر به صورت کمی اندازه‌گیری شده‌اند. این داده‌ها به صورت آنی نبوده و تنها برای مدت زمان محدود و مشخصی جمع‌آوری شده است. روش‌شناسی پژوهش حاضر به این صورت است که ابتدا به مدل‌سازی زنجیره تأمین حلقه بسته پیشنهادی پرداخته شده است. سپس، روش برنامه‌ریزی استوار پیشنهادی ارائه می‌گردد و مدل‌سازی در شرایط عدم قطعیت نیز صورت می‌گیرد.

#### ۱.۳. تشریح مسئله و مدل‌سازی

در شکل ۱، شبکه‌ای از زنجیره تأمین حلقه بسته مورد بررسی در صنعت نان نشان داده شده است. یک شبکه تأمین حلقه بسته که شامل تولیدکنندگان، مراکز توزیع، مراکز جمع‌آوری/بازرسی و مناطق مشتری می‌باشد، طراحی شده است. در جریان پیش‌رو، محصولات جدید (نان)، از تولیدکنندگان (مراکز تولید) به مراکز توزیع و از

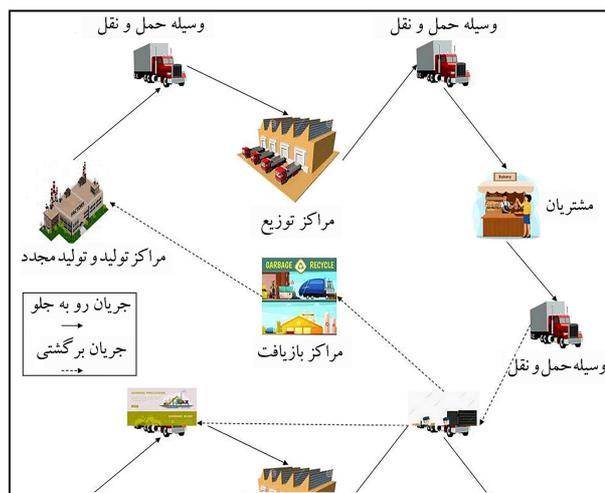
### ۲.۳. مفروضات پژوهش

۱. تولیدکننده، مسئول تولید نان تازه و بازیافت نان است؛
۲. براساس شواهد صورت گرفته، اطلاعات پژوهش‌های صورت گرفته و براساس آماری که در این صنعت اشاره شده است، نرخ بازگشت نان به مراکز تولیدی یک دهم در نظر گرفته شده است؛
۳. تقاضای مشتری با محصولات تولیدی و بازیافتی تأمین می‌شود؛
۴. مناطق مشتری (موقعیت مکانی مشتری) و محل مراکز تخلیه از پیش تعیین شده و ثابت فرض شده است؛
۵. پارامترهای تقاضا، هزینه‌ها و اثرات نامطلوب زیست محیطی نامطمئن و غیر قطعی در نظر گرفته شده‌اند؛
۶. مسأله تک دوره‌ای است.

### ۴. مدل‌سازی مسئله

تابع هدف در مدل‌سازی مسئله زنجیره تأمین حلقه بسته، حداقل‌سازی هزینه کل و حداقل‌سازی اثرات نامطلوب زیست محیطی است. تابع هدف هزینه شامل هزینه‌های استقرار مراکز تولید، توزیع و جمع‌آوری/بازرسی، هزینه‌های تولید، هزینه‌های انبارداری و حمل‌ونقل، هزینه دفع و بازرسی می‌باشد. همچنین، درآمد حاصل از فروش محصولات بازگشتی در این مدل لحاظ شده است. هنگامی که تابع هدف حداقل کردن هزینه می‌باشد، زمانی که هیچ یک از متغیرها مقدار نگیرند، کمترین هزینه را خواهیم داشت. اما درآمد حاصل از فروش محصولات بازگشتی به این دلیل لحاظ شده است که از صفر شدن مقادیر متغیرها جلوگیری شود. تابع هدف اثرات نامطلوب زیست محیطی شامل اثرات نامطلوب زیست محیطی استقرار مراکز، اثرات نامطلوب زیست محیطی مرتبط با تولید، توزیع و جمع‌آوری/بازرسی است. همچنین، صرفه‌جویی زیست محیطی حاصل از محصولات بازگشتی در این مدل لحاظ شده است.

اگرچه فسادپذیری نان به طور مستقیم در مدل‌سازی در نظر گرفته نشده است، در این موضوع که حجم مقدار محصول جابه‌جا شده بین مراکز باید با ظرفیت مراکز و یا



شکل ۱. شبکه زنجیره تأمین حلقه بسته نان صنعتی.

جمع‌آوری/بازرسی، از مقدار دریافتی از مناطق مشتری کوچک‌تر یا برابر آن است؛ محدودیت ۸: مقدار تولید شده توسط یک تولیدکننده برای پاسخگویی به تقاضای مشتری از مقادیر تولیدهای باز یافتی از جریان معکوس، بیش‌تر یا برابر آن است؛ محدودیت‌های ۹ و ۱۰: مقدار محصولی که از مراکز توزیع به مناطق مشتری حمل می‌شود و مقدار محصولی که از مناطق مشتری به مراکز جمع‌آوری/بازرسی‌ها حمل می‌شود، کوچک‌تر مساوی ظرفیت‌های مناطق است. همچنین، هیچ محصولی را نمی‌توان به مرکز توزیع ارسال کرد و هیچ محصول بازگشتی را نمی‌توان به مراکز جمع‌آوری/بازرسی ارسال کرد، مگر آن‌که آن مراکز ایجاد شده باشد؛ محدودیت ۱۱: محدودیت صفر و یک متغیرهای تصمیم‌گیری متناظر با آنها؛ محدودیت ۱۲: محدودیت غیرمنفی متغیرهای تصمیم‌گیری متناظر با آنها؛ رابطه ۱۳: هزینه حمل و نقل یک واحد محصول نان برگشتی از مراکز جمع‌آوری/بازرسی نان  $l$  به مراکز تولید نان  $i$ .

#### ۱.۴. مواجهه با عدم قطعیت (نامعینی جعبه‌ای)

برای مواجهه با عدم قطعیت در تقاضا و در نظر گرفتن تأثیر آن بر مدل‌سازی و روش حل، می‌توان از فازی‌سازی و یا لحاظ کردن پارامترها به صورت احتمالی استفاده کرد.<sup>[۳۲]</sup> با این حال، به دلیل نزدیکی بیش‌تر به واقعیت، در این پژوهش از رویکرد بهینه‌سازی استوار و اصول نامعینی جعبه‌ای در مسائل با ابعاد کوچک، متوسط و بزرگ استفاده شده است. بنتال و نیروفسکی، مسائل بهینه‌سازی محدبی را مطالعه کردند که در آن داده‌ها به طور دقیق مشخص نمی‌شوند و فقط متعلق به یک مجموعه نامعین هستند، اما محدودیت‌ها باید برای همه مقادیر ممکن داده‌های متعلق به آن مجموعه برقرار باشند.<sup>[۳۳]</sup> آنها نشان دادند اگر مجموعه به شکل بیضی نامعینی باشد، آن‌گاه برای برخی از مهم‌ترین مسائل بهینه‌سازی محدب عمومی، مانند برنامه‌ریزی خطی، برنامه‌ریزی کوادراتیک و برنامه‌ریزی محدب استوار متناظر با آن، خواه دقیق باشد، خواه تقریبی، یک مسئله قابل حل می‌باشند.<sup>[۳۴]</sup> در این تحقیق از رویکرد استوار بن تال و نیروفسکی استفاده شده است. در این رویکرد، با فرض اینکه داده‌ها در مجموعه‌های بیضوی دارای عدم قطعیت هستند، الگوریتم‌های کارایی برای حل مسائل بهینه‌سازی محدب تحت عدم قطعیت داده‌ها ارائه شده است. فرمول‌بندی‌های استوار به دست آمده از این روش، از نوع درجه دو مخروطی می‌باشند. بن تال و همکاران نشان دادند که در یک چهارچوب محدود، مدل استوار می‌تواند از یک مسئله نیمه بیکران نشدنی به یک مسئله تعادلی شدنی تبدیل شود که در آن مجموعه  $U_{\text{box}}$  به مجموعه کراندار  $U_{\text{exact}}$  جایگزین می‌شود. سوبستر، مدل بهینه‌سازی خطی را ارائه کرد که بهترین جواب موجه برای همه داده‌های ورودی را می‌دهد، به طوری که هر داده ورودی می‌تواند هر مقداری از یک بازه را بگیرد.<sup>[۳۵]</sup> این رویکرد به یافتن جواب‌هایی تمایل دارد که بیش از حد محافظه‌کارانه هستند. به این معنی که برای اطمینان از پایدار بودن جواب، در این رویکرد از بهینگی مسئله اسمی بسیار دور می‌شویم. به همین دلیل از این رویکرد استفاده نشده است. به عنوان مثال، پیشوایی، ربانی و ترابی برای مسائل بهینه‌سازی قطعی در رابطه

$$\begin{aligned} & \text{Min } cx + d \\ & \text{s.t. } Ax \leq b \end{aligned} \quad (14)$$

همچنین، مسئله بهینه‌سازی خطی نامعین مرتبط را به صورت رابطه ۱۵ تعریف کردند:<sup>[۳۶]</sup>

با تقاضای مشتری همخوانی داشته باشد، لحاظ شده است. به علاوه، معمولاً زمان مصرف نان صنعتی کوتاه و به مدت ۷ - ۱۰ روز است و پس از آن جمع‌آوری می‌گردد. این پنجره زمانی که نشان دهنده فسادپذیری است، در مدل‌سازی و نیز اطلاعات ورودی لحاظ شده است. همچنین، مسئله فسادپذیری نان به طور غیرمستقیم در دو تابع هدف حداقل کردن اثرات نامطلوب زیست محیطی و حداقل کردن هزینه تأثیرگذار است.

$$\begin{aligned} \text{Min } Z Z_1 \cong & \sum_i FP_i P_i + \sum_j FD_j D_j + \sum_l FC_l Z_l + \\ & \sum_i \sum_j CP_{ij} X_{ij} + \sum_j \sum_k CD_{jk} Y_{jk} \end{aligned} \quad (1)$$

$$\begin{aligned} & + \sum_k \sum_l CC_{kl} W_{kl} + \sum_l \sum_i CM_{li} V_{li} - \sum_l \sum_i SR_{li} V_{li} \\ \text{Min } Z Z_2 \cong & \sum_i efm_i P_i + \sum_j efd_j D_j + \sum_l efc_l C_l + \\ & \sum_j \sum_k etp_{ij} X_{ij} + \sum_j \sum_k etd_{jk} Y_{jk} \\ & + \sum_k \sum_l etk_{kl} W_{kl} + \sum_l \sum_i etc_{li} V_{li} - \sum_i \sum_j eti_{ij} V_{ij} \end{aligned} \quad (2)$$

محدودیت‌ها

$$\sum_j Y_{jk} \geq DD_k \quad \forall k \quad (3)$$

$$\sum_l W_{kl} \geq RD_k \quad \forall k \quad (4)$$

$$\sum_j X_{ij} \leq KK_i \times P_i \quad \forall i \quad (5)$$

$$\sum_i X_{ij} = \sum_k Y_{jk} \quad \forall j \quad (6)$$

$$\sum_i V_{li} \leq (1 - rc) \times \sum_k W_{kl} \quad \forall l \quad (7)$$

$$\sum_j X_{ij} \geq (1 - rp) \times \sum_l V_{li} \quad \forall i \quad (8)$$

$$\sum_k Y_{jk} \leq Capd_j \times d_j \quad \forall j \quad (9)$$

$$\sum_k W_{kl} \leq Capc_l \times Z_l \quad \forall l \quad (10)$$

$$P_i D_j Z_l \in \{1, 0\} \quad \forall i, j, l \quad (11)$$

$$X_{ij} Y_{jk} W_{kl} V_{li} \geq 0 \quad \forall i, j, k, l \quad (12)$$

$$\begin{aligned} & CM_{li} = \\ & CQ_l + rc \times CR_l + (1 - rc) \times CN_i + rp \times CT_i + (1 - rp) \times CS_i \end{aligned} \quad (13)$$

محدودیت ۳ و ۴: تقاضای کلی همه مشتریان و محصولات بازگشتی باید کاملاً رضایت بخش باشند؛

محدودیت ۵: کل مقدار تولیدی توسط یک تولیدکننده نمی‌تواند از ظرفیت آن فراتر رود. همچنین، هیچ محصولی را نمی‌توان از تولیدکننده  $i$  فرستاد، مگر آن‌که مرکز تولید ایجاد شده باشد؛

محدودیت ۶: مقدار محصولات ارسالی از مرکز توزیع نمی‌تواند بیش از مقدار دریافتی از تولیدکننده باشد؛

محدودیت ۷: کل مقدار محصولات بررسی شده و آماده ارسال از یک مرکز

$$cx \leq z - fy$$

$$\forall c \in U_{Box}^c \mid U_{Box}^c =$$

$$\{C \in R^{n_c} : |C_t - \bar{C}_t| \leq p_c G_t^c \quad \forall t \in \{1, \dots, n_c\} \quad (26)$$

سمت چپ محدودیت ۲۶ شامل بردار پارامترهای غیرقطعی است، به طوری که تمامی پارامترهای سمت راست قطعی هستند. بنابراین، فرم شدنی نامعادله بالا به صورت زیر نوشته می شود.

$$\sum_t (\bar{C}_t X_t - \eta_t) \leq z - fy$$

$$\rho_c G_t^c X_t \leq \eta_t \quad \forall t \in \{1, \dots, n_c\}$$

$$\rho_c G_t^c X_t \geq -\eta_t \quad \forall t \in \{1, \dots, n_c\} \quad (27)$$

به طور مشابه برای نامساوی ۲۰ داریم:

$$a_i x \geq d_i \quad \forall i \in \{1, \dots, n_d\}$$

$$\forall d \in U_{Box}^d \mid U_{Box}^d =$$

$$\{d \in R^{n_d} : |d_i - \bar{d}_i| \leq \rho_d G_i^d, \quad i = 1, \dots, n_d\} \quad (28)$$

که می توان آن را به شرح زیر بازنویسی کرد:

$$a_i x \geq \bar{d}_i + \rho_d G_i^d \quad \forall i \in \{1, \dots, n_d\} \quad (29)$$

همچنین، می توان با به کارگیری نقاط منتهی الیه  $U_{Box}$  را برای تبدیل محدودیت تساوی ۲۱ به تساوی های قابل حل به روش دقیق، توسعه داد. برای این منظور داریم:

$$H_j X = r_j, \quad \forall j \in \{1, \dots, n_r\}$$

$$\forall r \in U_{Box}^r \mid U_{Box}^r =$$

$$\{r \in R^{n_r} : |r_j - \bar{r}_j| \leq \rho_r G_j^r, \quad j = 1, \dots, n_r\} \quad (30)$$

با کمک نقاط منتهی الیه  $U_{Box}$ ، تساوی های نیمه معین بیان شده در بالا می تواند به نامساوی های قابل حل به روش دقیق زیر تبدیل شوند:

$$H_j X \geq \bar{r}_j - \rho_r G_j^r \quad \forall j \in \{1, \dots, n_r\}$$

$$H_j X \leq \bar{r}_j + \rho_r G_j^r \quad \forall j \in \{1, \dots, n_r\} \quad (31)$$

سرانجام، با توجه به تغییرات صورت گرفته، ساختار استوار مدل می تواند به شرح زیر نوشته شود:

$$Min z$$

$$s.t. \sum_t (\bar{C}_t X_t - \eta_t) \leq z - fy$$

$$\rho_c G_t^c X_t \leq \eta_t \quad \forall t \in \{1, \dots, n_c\}$$

$$\rho_c G_t^c X_t \geq -\eta_t \quad \forall t \in \{1, \dots, n_c\}$$

$$H_j X \geq \bar{r}_j - \rho_r G_j^r \quad \forall i \in \{1, \dots, n_d\}$$

$$H_j X \geq \bar{r}_j - \rho_r G_j^r \quad \forall j \in \{1, \dots, n_r\}$$

$$N x = 0 \quad \forall j \in \{1, \dots, n_r\}$$

$$M x \leq 0$$

$$B x \leq C y$$

$$y \in \{0, 1\}, x \in R^+ \quad (32)$$

$$Min cx + d$$

$$s.t. Ax \leq b$$

$$c, d, A, b \in U \quad (15)$$

در این مدل، پارامترهای  $A, b, c, d$  در مجموعه نامعین مفروض  $U$  تغییر می کنند. یک بردار  $X$ ، یک پاسخ استوار ممکن برای این مسئله می باشد، اگر برای همه مقادیر مجموعه نامعین  $U$  در محدودیت ها صدق کند. بنابراین، نسخه استوار این مسئله به صورت رابطه ۱۶ می باشد:

$$Min\{\hat{c}(x) = sup(c, d, A, b \in U) [cx] + d\} : Ax \leq b$$

$$\forall c, d, A, b \in U \quad (16)$$

یک پاسخ بهینه به مسئله ۱۴، یک پاسخ استوار بهینه به مسئله ۱۵ می باشد. چنین پاسخی برای همه مقادیر ممکن داده ها، محدودیت ها را برآورده کرده و تضمین می کند که مقدار بهینه تابع هدف بدتر از  $\hat{c}(x)$  نباشد. در اینجا، مسئله ۱۶ یک مسئله بهینه سازی خطی نیمه نامحدود بوده و به نظر می رسد که از نظر محاسباتی غیرقابل حل به روش دقیق باشد. با این حال، برای بسیاری از مجموعه های نامعین محدب و پیوسته کاربرد دارد. مدل نسخه استوار یک مسئله ریاضی محدب قابل حل، معمولاً یک بهینه سازی خطی یا یک مسئله کوآدراتیک غیرخطی است. در این حالت فرض می شود هر یک از این پارامترهای نامعین در یک بازه ی محدود و مشخص تغییر می کنند. شکل کلی این بازه به صورت رابطه ۱۷ بیان می شود:

$$u_{Box} = \{\xi \in R^n : |\xi_t - \bar{\xi}_t| \leq \rho G_t \quad t = 1, \dots, n\} \quad (17)$$

در عبارت فوق  $\bar{\xi}_t$  یک مقدار اسمی از  $\xi$  به عنوان پارامتر  $t$ ام بردار  $\xi$  (بردار  $n$  بعدی) و مقادیر مثبت  $G_t$  مقیاس نامعینی و  $\rho \geq 0$  سطح نامعینی را نمایش می دهد. در یک مورد خاص، می توان  $G_t = \bar{\xi}_t$  را تعریف کرد که متناظر با یک مورد ساده است و انحراف از داده های اسمی بازه ای که  $\xi_t$  را دربر می گیرد، به اندازه  $\rho$  است. طبق توضیحات بالا، معادل استوار مدل فشرده به صورت روابط زیر تعریف می شود:

$$Min z \quad (18)$$

$$s.t. fy + cx \leq z \quad \forall c \in U_{Box}^c \quad (19)$$

$$Ax \geq d \quad \forall d \in U_{Box}^d \quad (20)$$

$$Hx = r \quad \forall r \in U_{Box}^r \quad (21)$$

$$Nx = 0 \quad (22)$$

$$Mx \leq 0 \quad (23)$$

$$Bx \leq Cy \quad (24)$$

$$y \in \{0, 1\}, x \in R^+ \quad (25)$$

در این مورد که بازه مورد نظر محدود شده است، نسخه استوار مسئله می تواند به یک مدل معادل قابل حل به روش دقیق تبدیل شود که در آن  $U_{Box}$  با یک مجموعه محدود  $U_{ext}$  که شامل نقاط مرزی  $U_{Box}$  است، جایگزین می شود. برای نمایش شکل نرم ۴ مدل فشرده استوار باید محدودیت های ۱۸ تا ۲۵ به معادل تغییر یابند. بنابراین، برای عبارت ۱۸ داریم:

$$\sum_{l \in L} W_{kl} \geq \overline{RD}_k + \rho_{RD} G_k^{RD} \quad \forall k \in K \quad (48)$$

$$\sum_j X_{ij} \leq K K_i \times P_i \quad \forall i \quad (49)$$

$$\sum_i X_{ij} = \sum_k Y_{jk} \quad \forall j \quad (50)$$

$$\sum_i V_{ii} \leq (1 - rc) \times \sum_k W_{kl} \quad \forall i \quad (51)$$

$$\sum_j X_{ij} \geq (1 - rp) \times \sum_l V_{ii} \quad \forall i \quad (52)$$

$$\sum_k Y_{jk} \leq Capd_j \times d_j \quad \forall j \quad (53)$$

$$\sum_k W_{kl} \leq Capc_l \times Z_l \quad \forall l \quad (54)$$

$$P_i, d_j, Z_l \in \{1, 0\} \quad \forall i \in I, \forall j \in J, \forall l \in L \quad (55)$$

$$X_{ij}, Y_{jk}, W_{kl}, V_{ii}, \eta_{ij}^{cp}, \eta_{jk}^{cd}, \eta_{kl}^{cc}, \eta_{ii}^{cn}, \eta_{ii}^{sr}, \eta_{ij}^{etp}, \eta_{jk}^{etd}, \eta_{kl}^{etk}, \eta_{ii}^{etc} \geq 0 \quad (56)$$

### ۳.۴. رویکرد حل برنامه ریزی فازی تعاملی

چندین روش برای حل مدل های برنامه ریزی خطی چند هدفه در پژوهش های صورت گرفته وجود دارد که از بین آنها رویکردهای برنامه ریزی فازی به طور فزاینده ای به کار گرفته شده اند. مزیت عمده ی رویکردهای فازی این است که قادر هستند درجه اقتناع هر تابع هدف را به صورت صریح اندازه گیری کنند. این موضوع می تواند به تصمیم گیرندگان کمک کند تا تصمیم نهایی را با انتخاب یک جواب کارای ترجیحی بر طبق درجه اقتناع و ترجیح (اهمیت نسبی) هر یک از توابع هدف بگیرند. زیرمن، اولین رویکرد فازی موسوم به رویکرد مکس مین را برای حل مسائل چند هدفه توسعه داد. با این وجود، ممکن است نتایج این رویکرد کارآمد نباشد. [۳۷] عملکرد min زاده، تنها بر روی حداکثرسازی حداقل درجه عضویت تمرکز می کند. با این حال، این عملکرد، یک عملکرد جبرانی نیست. یعنی نمی تواند بین اهداف با درجه عضویت بالا در مقابل اهداف با درجه عضویت پایین بده تبادل انجام دهد. بنابراین، برای حل این مسئله و جستجوی نتایج بهتر از عملگرهای جبرانی کارای دیگری برای تنظیم توابع هدف در برنامه ریزی فازی استفاده شده است. سپس، چندین روش برای حذف این ناکارایی پیشنهاد شد. [۳۸] برای نمونه ورنرز عملکرد «و فازی ۵»، [۳۹] سلیم و اوزکارهان یک نسخه جدید از رویکرد ورنرز [۴۰] و ترابی و هسینی یک رویکرد تک مرحله ای برای غلبه بر ضعف رویکرد زیرمن پیشنهاد کردند. در این پژوهش، از رویکرد ترابی و هسینی (TH) برای ادغام توابع هدف استفاده شده است. [۴۱]

### ۱.۳.۴. رویکرد ترابی و هسینی (۲۰۰۸)

بر اساس بررسی های عددی از رویکردهای پیشین حل مسائل چندهدفه که ترابی و هسینی انجام داده اند، ناکارایی هایی در این رویکردها بیان می شود. از بین روش های یک مرحله ای (روش لای و هوانگ و روش سلیم) که مسئله اصلی را تنها با یک مدل قطعی کمکی حل می کنند، روش لای و هوانگ گاهی در مقایسه با روش دو مرحله ای لی و همکاران، جواب های ناکارآمدی تولید می کند. روش سلیم نیز معمولاً راه حل کارا، اما مصالحه ای ضعیف و نامتوازانی را ارائه می کند. به طوری که درجه اقتناع توابع هدف تفاوت قابل ملاحظه ای با یکدیگر دارند که اغلب از نظر تصمیم گیرندگان غیرقابل قبول است. روش دو مرحله ای لی و همکاران همیشه یک راه حل کارا تولید

### ۲.۴. رویکرد برنامه ریزی استوار پیشنهادی

در راستای پیاده سازی تغییرات لازم، با افزودن ثابت  $\rho$  و در نظر گرفتن پارامترهای مربوط به هزینه، اثرات نامطلوب زیست محیطی و تقاضا به صورت عدم قطعیت، مدل استوار شده به صورت زیر تعریف می شود:

$$\text{Min} Z Z_1 \quad (33)$$

$$\text{Min} Z Z_2 \quad (34)$$

Subject to :

$$\begin{aligned} & \sum_i F P_i P_i + \sum_j F D_j d_j + \sum_l F C_l Z_l + \sum_i \sum_j (\overline{C P}_{ij} X_{ij} + \eta_{ij}^{cp}) \\ & + \sum_j \sum_k (\overline{C D}_{jk} Y_{jk} + \eta_{jk}^{cd}) + \sum_k \sum_l (\overline{C C}_{kl} W_{kl} + \eta_{kl}^{cc}) + \\ & \sum_l \sum_i (\overline{C N}_{li} V_{ii} + \eta_{ii}^{cn}) - \sum_l \sum_i (\overline{S R}_{li} V_{ii} - \eta_{ii}^{sr}) \end{aligned} \quad (35)$$

$$\begin{aligned} & \sum_i e f m_i F_i + \sum_j e f d_j F_j + \sum_l e f c_l F_l + \sum_j \sum_k (\overline{e t p}_{ij} X_{ij} + \eta_{ij}^{etp}) \\ & + \sum_j \sum_k (\overline{e t d}_{jk} Y_{jk} + \eta_{jk}^{etd}) + \sum_k \sum_l (\overline{e t k}_{kl} W_{kl} + \eta_{kl}^{etk}) \\ & + \sum_i \sum_j (\overline{e t c}_{ii} V_{ii} + \eta_{ii}^{etc}) - \sum_i \sum_j (\overline{e t i}_{ii} V_{ii} + \eta_{ii}^{eti}) \end{aligned} \quad (36)$$

$$\rho_{cp} G_{ij}^{cp} x_{ij} \leq \eta_{ij}^{cp} \quad \forall i \in I, \forall j \in J \quad (37)$$

$$\rho_{cp} G_{ij}^{cp} x_{ij} \geq -\eta_{ij}^{cp} \quad \forall i \in I, \forall j \in J$$

$$\rho_{cd} G_{jk}^{cd} y_{jk} \leq \eta_{jk}^{cd} \quad \forall j \in J, \forall k \in K \quad (38)$$

$$\rho_{cd} G_{jk}^{cd} y_{jk} \geq -\eta_{jk}^{cd} \quad \forall j \in J, \forall k \in K$$

$$\rho_{cn} G_{li}^{cn} v_{ii} \leq \eta_{ii}^{cn} \quad \forall l \in L, \forall i \in I \quad (39)$$

$$\rho_{cn} G_{li}^{cn} v_{ii} \geq -\eta_{ii}^{cn} \quad \forall l \in L, \forall i \in I$$

$$\rho_{cn} G_{li}^{cn} v_{ii} \leq \eta_{ii}^{cn} \quad \forall l \in L, \forall i \in I \quad (40)$$

$$\rho_{cn} G_{li}^{cn} v_{ii} \geq -\eta_{ii}^{cn} \quad \forall l \in L, \forall i \in I$$

$$\rho_{sr} G_{li}^{sr} v_{ii} \leq \eta_{ii}^{sr} \quad \forall l \in L, \forall i \in I \quad (41)$$

$$\rho_{sr} G_{li}^{sr} v_{ii} \geq -\eta_{ii}^{sr} \quad \forall l \in L, \forall i \in I$$

$$\rho_{etp} G_{ij}^{etp} x_{ij} \leq \eta_{ij}^{etp} \quad \forall i \in I, \forall j \in J \quad (42)$$

$$\rho_{etp} G_{ij}^{etp} x_{ij} \geq -\eta_{ij}^{etp} \quad \forall i \in I, \forall j \in J$$

$$\rho_{etd} G_{jk}^{etd} y_{jk} \leq \eta_{jk}^{etd} \quad \forall j \in J, \forall k \in K \quad (43)$$

$$\rho_{etd} G_{jk}^{etd} y_{jk} \geq -\eta_{jk}^{etd} \quad \forall j \in J, \forall k \in K$$

$$\rho_{etk} G_{kl}^{etk} w_{kl} \leq \eta_{kl}^{etk} \quad \forall j \in J, \forall k \in K \quad (44)$$

$$\rho_{etk} G_{kl}^{etk} w_{kl} \geq -\eta_{kl}^{etk} \quad \forall j \in J, \forall k \in K$$

$$\rho_{etc} G_{li}^{etc} v_{ii} \leq \eta_{ii}^{etc} \quad \forall l \in L, \forall i \in I \quad (45)$$

$$\rho_{etc} G_{li}^{etc} v_{ii} \geq -\eta_{ii}^{etc} \quad \forall l \in L, \forall i \in I$$

$$\rho_{eti} G_{li}^{eti} v_{ii} \leq \eta_{ii}^{eti} \quad \forall l \in L, \forall i \in I \quad (46)$$

$$\rho_{eti} G_{li}^{eti} v_{ii} \geq -\eta_{ii}^{eti} \quad \forall l \in L, \forall i \in I$$

$$\sum_{j \in J} Y_{jk} \geq \overline{DD}_k + \rho_{DD} G_k^{DD} \quad \forall k \in K \quad (47)$$

جدول ۲. مقدار پارامترهای قطعی مدل. [۴۳]

نماد	مقدار	نماد	مقدار
$FP_i$	۱۰۰۰	$SR_{li}$	Uniform (۱۰۰, ۲۰۰)
$FD_j$	۳۰۰	$efm_i$	Uniform (۵۰, ۷۰)
$FC_l$	۴۰۰	$efd_j$	Uniform (۲۰, ۲۵)
$CP_{ij}$	Uniform (۵۰, ۱۰۰)	$efc_l$	Uniform (۲۰, ۲۵)
$CD_{jk}$	Uniform (۵۰, ۱۰۰)	$etp_{ij}$	Uniform (۳, ۱۲)
$CC_{kl}$	Uniform (۴۰, ۴۶)	$etd_{jk}$	Uniform (۲, ۸)
$CN_{li}$	Uniform (۵۰, ۱۰۰)	$etk_{kl}$	Uniform (۱, ۴)
$CQ_l$	۱	$etc_{li}$	Uniform (۲, ۸)
$CR_l$	۱	$eti_{li}$	Uniform (۴, ۲۰)
$CS_i$	۱	$C$	۱۲۰۰۰۰۰
$CT_i$	۱		

جدول ۳. مقدار پارامترهای قطعی مدل. [۴۲]

نماد	$Capc_l$	$Capd_j$	$KK_i$	$RD_k$	$DD_k$
	۹۰۰۰۰	۴۰۰۰۰۰	۷۶۴۰۰۰۰	۴۰۰۰۰۰	۱۱۰۰۰۰
	۹۰۰۰۰	۴۰۰۰۰۰	۷۴۰۰۰	۱۰۰۰۰	۱۵۰۰۰۰
	۹۰۰۰۰	۴۰۰۰۰۰	۶۰۰۰۰	۹۵۶۰	۱۲۰۰۰۰
	۹۰۰۰۰	۴۰۰۰۰۰	۵۰۰۰۰۰	۸۸۵۴۰	۱۴۵۰۰۰
	۹۰۰۰۰	۴۰۰۰۰۰	۶۵۰۰۰۰	۲۳۰۰	۱۶۰۰۰۰
مقدار	۹۰۰۰۰	۴۰۰۰۰۰	۴۰۰۰۰۰	۵۵۰۰	۱۳۵۰۰۰
	۹۰۰۰۰	۴۰۰۰۰۰		۲۰۰۰۰	۱۲۰۰۰۰
	۹۰۰۰۰	۴۰۰۰۰۰		۳۳۵۲۵	۱۶۵۰۰۰
	۹۰۰۰۰	۴۰۰۰۰۰		۳۳۰۰۰	۱۵۰۰۰۰
	۹۰۰۰۰	۴۰۰۰۰۰		۹۸۰۰	۱۴۰۰۰۰

برگشتی در هر منطقه مشتری اعداد فازی در نظر گرفته شده است. برای ارزیابی اثرات نامطلوب زیست محیطی از روش ۹۹ Eco-indicator استفاده شده است. برای ارزیابی عملکرد مدل زنجیره تامین حلقه بسته استوار چندهدفه، چندین آزمایش عددی پیاده‌سازی شده و نتایج مرتبط در این بخش گزارش شده است. برای این منظور، چهار مسئله آزمون با اندازه‌های مختلف در نظر گرفته شده و برای هر اندازه آزمایش‌ها در سه سطح عدم اطمینان مختلف اندازه‌گیری شده است.  $(\rho = 0/5, 0/2, 0)$ . ابتدا مدل‌های قطعی و استوار، تحت داده‌های اسمی حل می‌شوند. برخی از داده‌های اسمی به صورت تصادفی و با استفاده از توزیع‌های تصادفی مشخص شده در جدول ۲ تولید می‌شوند. سپس، در زیر هر سطح عدم قطعیت، پنج مجموعه تصادفی به طور بکخواخت در مجموعه عدم قطعیت مربوطه تولید می‌گردند (ارزش اسمی  $\rho G$  - و ارزش اسمی  $+\rho G$ ) برای تجزیه و تحلیل عملکرد راه‌حل‌های به دست آمده، مدل‌های قطعی و استوار پیشنهاد شده است. هر دو تابع هدف هزینه و اثرات زیست محیطی در هر دو شرایط قطعی و استوار که با استفاده از روش ترابی و هسینی (TH) ادغام شده‌اند، به صورت  $z$  در جدول بیان شده است. هر دو مدل قطعی و استوار مسئله با استفاده از نرم‌افزار ۲۴/۹ GAMS و با استفاده از رایانه با پردازنده CPU CORIEV و RAM ۴ حل شده است. دو شاخص عملکرد میانگین و انحراف معیار ارزش‌های عملکرد هدف در حین اجرای تصادفی برای ارزیابی هر دو مدل قطعی و استوار استفاده شده است. عدم اطمینان برای هزینه‌ها، اثرات زیست محیطی و همچنین تقاضای محصول نان و تقاضای نان برگشتی لحاظ شده است. در جدول ۴، میانگین و انحراف معیار تابع هدف در عدم

می‌کند، اما همچنان به زمان محاسباتی بیش‌تری نسبت به روش‌های یک مرحله‌ای نیاز دارد. این مسئله به ویژه در حل مدل‌های خطی عدد صحیح مختلط چندهدفه اهمیت بیش‌تری پیدا می‌کند. برای حل این مشکلات، ترابی و هسینی با حذف ناکارایی مذکور یک رویکرد تک مرحله‌ای جدید به صورت زیر توسعه داده‌اند. در واقع، استفاده از روش ترابی و هسینی جواب‌های کاراتری خواهد داشت. در این روش به جای بیشینه کردن مینیمم درجه عضویت‌ها، ترکیب محدبی از مجموع موزون درجه عضویت‌ها و مینیمم درجه عضویت‌ها، ماکزیمم می‌شود، به طوری که فاصله بین توابع هدف از مقدار ایده‌آل آن کمیته می‌شود.

$$\max \lambda(x) = \gamma \lambda_0 - (1 - \gamma) \sum_g \theta_g \mu_g(Z_g)$$

$$st : \lambda_0 \leq \mu_g(Z_g) \quad g = 1, 2$$

$$x \in F(x)$$

$$\lambda, \lambda_0, \gamma \in [0, 1] \quad (57)$$

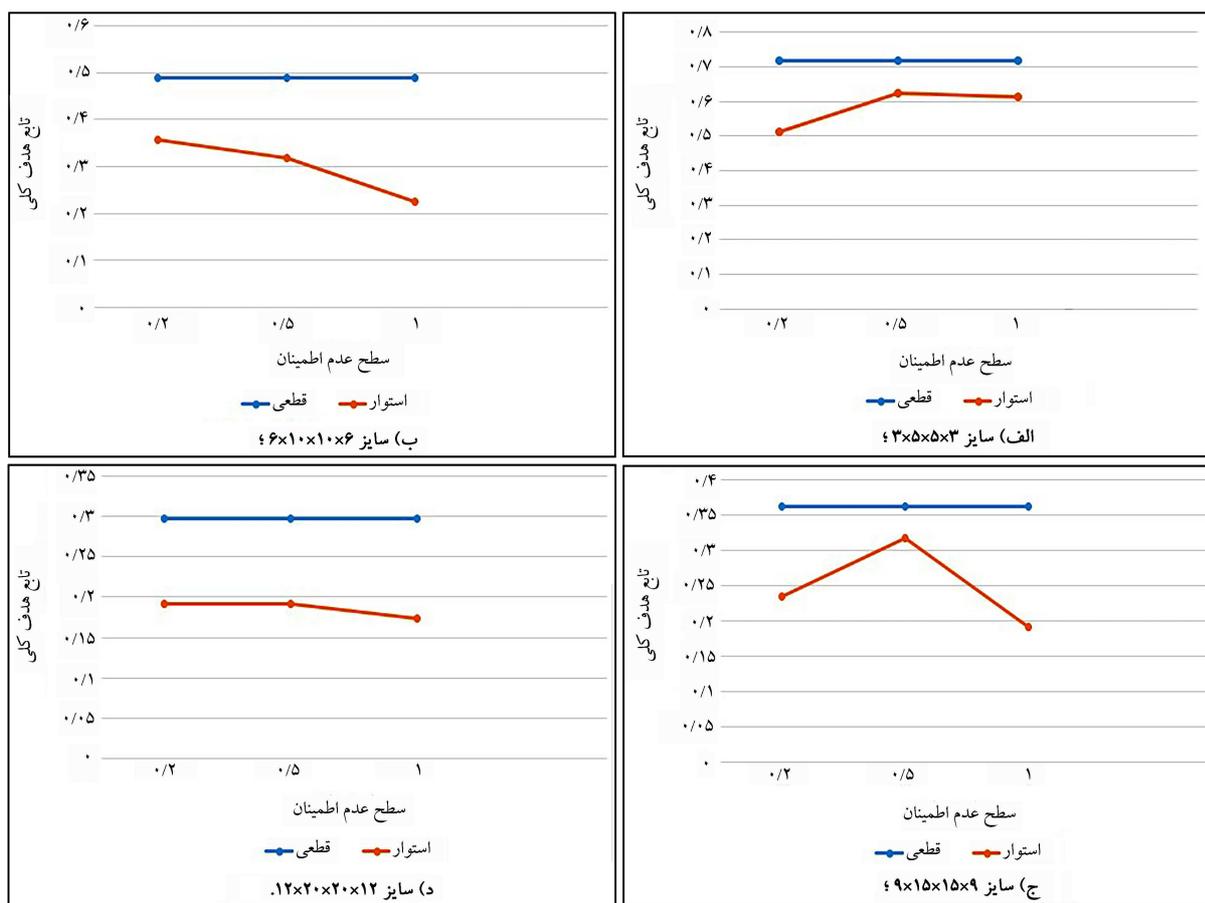
$\theta_g$  و  $\gamma$ ، به ترتیب اهمیت  $g$  امین تابع هدف و ضریب جبران را نشان می‌دهند. مقدار بهینه متغیر  $\lambda_0 = \min\{\mu_g(Z_g)\}$  حداقل درجه اقتناع تابع هدف را نشان می‌دهد و تابع تجمیع این رویکرد نیز در جستجوی یک مقدار مصالحه‌ای بین عملگر  $\min$  و عملگر جمع موزون بوده که مبتنی بر مقدار  $\gamma$  است. به عبارت دیگر، تصمیم‌گیرندگان می‌توانند با دستکاری مقدار پارامترهای  $\theta_g$  و  $\gamma$  با توجه به ترجیحات خود، به هر دو راه‌حل مصالحه‌ای متوازن و نامتوازن برسند.  $\gamma$  حداقل سطح اقتناع اهداف و درجه مصالحه بین اهداف را کنترل می‌کند. مقدار بالاتر برای این پارامتر نشان می‌دهد که اهمیت بیشتری برای دستیابی به یک کران پایین بالاتر برای درجه اقتناع اهداف ( $\lambda_0$ ) قائل هستیم. این امر می‌تواند به دستیابی به راه‌حل‌های مصالحه‌ای متوازن‌تری کمک کند. در مقابل، مقدار پایین‌تر برای این پارامتر نشان می‌دهد که اهمیت بیشتری برای دستیابی به یک راه‌حل با درجه اقتناع بالاتر برای برخی اهداف با اهمیت نسبی بالاتر قائل هستیم. این امر می‌تواند منجر به تولید راه‌حل‌های مصالحه‌ای نامتوازن شود. قابل توجه است که همبستگی معکوسی بین  $\gamma$  و دامنه تغییرات مقدار  $\theta_g$  ( $\max_g\{\theta_g\} - \min_g\{\theta_g\}$ ) وجود دارد. بنابراین، برای  $\gamma$  یک فاصله منطقی محدود وجود دارد که در این فاصله این پارامتر می‌تواند برای یک بردار معین  $\theta_g$  انتخاب شود. برای مثال، برای مقادیر بزرگ دامنه تغییرات  $\theta_g$ ،  $\gamma$  باید به صورت یک مقدار کوچک انتخاب شود (مثلاً کوچکتر از  $0/3$ ). زیرا در این مورد، ترجیح ضریب تصمیم‌گیرندگان با یک راه‌حل مصالحه‌ای نامتوازن است. [۴۱]

## ۵. پیاده‌سازی و نتایج

داده‌های استفاده شده در این پژوهش نیز، از پژوهش‌های مرجع می‌باشند که در جدول‌های ۲ و ۳ نشان داده شده‌اند. این داده‌ها شامل داده هزینه‌های احداث مراکز، هزینه‌های حمل و نقل بین مراکز، تقاضای مشتری و ظرفیت مراکز می‌باشند. برای نشان دادن عملکرد و کاربرد مدل پیشنهادی، مسئله زنجیره تامین حلقه بسته مورد مطالعاتی مورد بررسی قرار گرفته و نتایج آن در این بخش ارائه شده است. در این پژوهش، مسئله زنجیره تامین دارای ۶ مرکز تولید، ۱۰ مرکز توزیع، ۶ مرکز جمع‌آوری/بازرسی و ۱۰ مرکز مربوط به حیطة مشتریان است. سطح عدم قطعیت مدل برابر  $\rho = 0/5$  در نظر گرفته شده است. به دلیل نوسانات تقاضا، نمی‌توان تقاضای هر منطقه مشتری را به طور دقیق پیش‌بینی کرد. بنابراین، تقاضا و مقدار محصول

جدول ۴. میانگین و انحراف معیار توابع هدف در عدم قطعیت های متفاوت در اندازه مختلف.

سایز مساله	سطح عدم قطعیت	مقدار تابع هدف در داده های اسمی		زمان محاسبه تابع هدف در داده های اسمی		میانگین تابع هدف محقق شده		انحراف معیار تابع هدف محقق شده	
		قطعی	استوار	قطعی	استوار	قطعی	استوار	قطعی	استوار
۳*۵*۵*۳	۰.۲	$z1=82677807,9$	۱۳۸۶۶۶۹۳.۶	۰.۳	۰.۱	$z1=80073167,8$	۱۱۹۵۵۹۱۹۸.۷	۵۷۴۱۸۵۸.۸	۵۹۰۸۷۳۰
		$z2=7008109,2$	۱۰۲۸۶۰۰۳.۸			$z2=5401029,8$	۱۰۷۴۳۹۶۶.۴	۶۶۸۴۱۳.۱	۲۰۱۵۹۴۸.۴
		$zz=-,744$	۰.۳۰۴			$zz=-,716$	۰.۵۱۳	۰.۱۱۳	۰.۲۲۶
	۰.۵		۱۹۸۴۲۳۵۶			۰.۱۷	۱۹۶۴۸۳۰۴۳.۵		۷۴۹۵۸۴۸.۲
			۱۵۷۹۷۶۰۵.۱				۳۶۰۸۹۲۱۹.۷		۳۹۱۶۹۷۳۴.۵
			۰.۶۳۷				۰.۶۲۲		۰.۱۶۲
	۱		۳۶۴۴۷۱۸۳۱.۴			۰.۲۵	۳۶۰۲۶۶۸۱.۸		۱۹۲۹۱۹۶۸.۸
			۲۸۹۹۴۰۸۴.۳				۲۹۸۹۳۹۸۴.۶		۲۳۱۶۷۸۹.۵
			۰.۴۵۴				۰.۶۱۴		۰.۱۴۶
۶*۱۰*۱۰*۶	۰.۲	$z1=169096067,1$	۲۵۶۵۸۳۷۷۵.۴	۰.۱۷	۰.۲۷	$z1=164932781,4$	۲۳۳۵۵۶۸۸۸.۷	۲۲۸۸۲۹۲۱.۹	۱۲۷۷۹۶۹۷
		$z2=11340633,4$	۲۶۷۹۵۷۲۹.۶			$z2=98873976,2$	۲۲۶۸۱۰۲۴.۸	۱۶۴۵۶۹۴.۵	۷۶۰۶۵۲.۱
		$zz=-,417$	۰.۱۴۸			$zz=-,488$	۰.۳۵۸	۰.۱۹	۰.۰۶۹
	۰.۵		۳۶۷۶۱۵۸۳۱.۸			۰.۲۲	۳۹۰۱۹۲۷۹۷.۹		۲۰۶۰۷۸۶۷.۵
			۲۸۲۲۲۲۰۷.۱				۵۲۰۹۶۳۳۴.۷		۳۶۲۵۲۷۵.۳
			۰.۷۲۲				۰.۳۱۷		۰.۲۰۷
	۱		۷۲۰۶۱۰۳۸۴.۲			۰.۱۹	۷۲۱۷۸۱۳۸۹.۲		۱۰۴۴۶۶۶۵.۷
			۶۳۴۵۲۱۴۶.۵				۶۲۹۳۳۸۷۰.۱		۵۳۹۰۸۰۸.۶
			۰.۲۳				۰.۲۲۵		۰.۰۶۹
۹*۱۵*۱۵*۹	۰.۲	$z1=270802723,7$	۳۱۹۱۸۵۶۸۵.۳	۰.۲۵	۰.۵۵	$z1=248177179,9$	۳۶۸۹۵۷۳۲۹	۳۶۵۶۹۲۸۵.۷	۱۲۱۸۷۱۱۴.۳
		$z2=23027211,4$	۲۰۰۴۸۴۵۳			$z2=188722177,3$	۳۳۲۳۱۲۶۲.۶	۴۲۷۹۳۴.۲	۳۵۶۵۷۲۲.۳
		$zz=100$	۰.۷۸۱			$zz=-,362$	۰.۲۳۴	۰.۲۷	۰.۱۳
	۰.۵		۵۴۵۷۹۳۴۷۵.۵			۰.۸۱	۵۰۹۲۰۲۵۲۸.۸		۲۲۶۲۳۶۲۷۱.۱
			۳۷۳۸۹۹۹۰.۹				۵۲۰۹۳۳۳۴.۷		۷۸۸۰۰۱۵.۳
			۰.۷۹۵				۰.۳۱۷		۰.۲۲۷
	۱		۱۱۱۵۰۲۴۸۹۸			۰.۵	۱۱۱۸۴۴۱۰۹		۷۹۸۵۷۶۴.۵
			۱۰۳۷۳۶۵۷۲.۷				۹۸۷۷۶۹۰۸.۸		۸۵۳۳۹۲۳.۱
			۰.۱۸۶				۰.۱۹۱		۰.۴۳۷
۱۲*۲۰*۲۰*۱۲	۰.۲	$z1=309749141,7$	۵۴۲۹۴۴۷۱۶.۲	۰.۴۲	۰.۹۱	$z1=331808013,0$	۵۲۹۵۴۹۲۲۲.۷	۵۱۹۷۲۵۸۵.۱	۶۰۳۹۱۰۳.۱
		$z2=19242887,1$	۴۴۵۹۰۵۸۴.۵			$z2=21290044,8$	۴۵۲۵۲۷۲۲	۵۳۶۷۸۰۵.۳	۶۷۱۶۲۵.۲
		$zz=-,487$	۰.۰۳۶			$zz=-,346$	۰.۱۳۶	۰.۲۹۸	۰.۱۹۲
	۰.۵		۹۴۴۴۳۸۵۷			۰.۵۹	۹۰۳۵۱۷۱۵۲.۲		۵۱۰۱۱۲۶.۸
			۷۰۴۱۷۸۲۷.۲				۶۷۳۴۷۷۶۹.۷		۸۳۶۸۱۱۱
			۰.۱				۰.۲۱۲		۰.۱۹۱
	۱		۱۵۳۳۷۲۲۷۰			۰.۵۸	۱۵۳۹۶۴۶۰۰		۳۸۷۸۱۷۹۷
			۱۳۲۶۰۷۵۲۰.۹				۱۱۹۶۰۵۰۹۵.۳		۸۷۸۳۲۹۹.۳
			۰.۲۹				۰.۲۲۳		۰.۱۷۳



شکل ۲. مقادیر توابع هدف کلی در شرایط قطععی و استوار در چهار اندازه مختلف.

۰/۵ و  $\rho = ۱$  با اختلاف زیاد غلبه می‌کند و در سایر موارد، رویکرد قطععی نتایج بهتری دارد. همچنین، نتایج نشان می‌دهد استراتژی استوار در مسائل بزرگ و نیز عدم قطعیت بالاتر نسبت به قطععی، عملکرد بهتری دارد. شکاف بین این دو رویکرد، با توجه به هر دو ضریب عملکرد (به ویژه برای انحراف معیار) در اغلب موارد با توجه به اندازه مسئله و عدم قطعیت، افزایش می‌یابد. (در تحلیل روش TH می‌توان اشاره کرد که هرچه مقدار اعداد به دست آمده از این روش به صفر نزدیک‌تر باشد، جواب‌ها بهتر است، زیرا بین اهداف توازن بیشتری برقرار شده است). در شکل ۲ مقادیر توابع هدف کلی در شرایط قطععی و استوار در چهار اندازه مختلف نمایش داده شده است.

تحلیل حساسیت روی پارامترهای مهم از جمله پارامترهای هزینه، ظرفیت، تقاضا، اثرات نامطلوب زیست محیطی، نرخ دفع صورت گرفته است. نتایج تحلیل حساسیت‌های صورت گرفته برخی پارامترها به شرح جداول ۵ الی ۷ می‌باشد.

## ۶. نتیجه‌گیری و پیشنهادات

روش‌های سنتی تولید نان با استفاده از تنور بسیار انرژی‌بر بوده و زحمات و مواد زیادی را هدر می‌دهد. به علاوه، کیفیت نان پخته شده چندان خوب نیست و فقط می‌توان آن را برای مدت زمان کوتاهی حفظ کرده و بیشتر قسمت‌های آن هدر می‌رود. این نان ضایع شده بسیار ارزشمند است و می‌توان آن را بازیافت و در

قطعیت‌های متفاوت در چهار اندازه مختلف ارائه شده است. ذکر این نکته ضروری است که نان‌های برگشتی بعد از بازرسی به آرد تبدیل شده، آردها کیفیت یکسانی ندارند و گاهی از نظر کیفیت برای تولید نان مناسب نیستند. در همین راستا، به منظور بهبود کیفیت، آرد مصرفی با آرد دارای گلوتن زیاد مخلوط می‌گردد. نسبت اختلاط آردهای مختلف در واحدهای تولید کننده نان اغلب براساس تجربه صورت می‌پذیرد. از آنجا که کیفیت آردهای جدید برای تولید مناسب هستند، بنابراین، مصرف‌کننده‌ها نیز تمایل به استفاده از نان‌های تولید مجدد شده را دارند و به ازای هر واحد نان برگشتی، یک واحد نان مجدد تولید می‌شود. از آنجا که بیش‌ترین هزینه در شرایط قطععی و عدم قطعیت مربوط به هزینه‌های تولید و حمل‌ونقل نان صنعتی از مراکز تولید به توزیع می‌باشد، بنابراین، نیاز است که روی این بخش تمرکز ویژه‌ای صورت گیرد و هزینه‌های تولید را با استفاده از تجهیزات مناسب تولید، برنامه‌ریزی صحیح تولید و روش‌های مناسب دیگر کاهش داد. همچنین، می‌توان با استفاده از سیستم مناسب حمل‌ونقل و نزدیک کردن مراکز تولید، توزیع، جمع‌آوری/بازرسی هزینه‌های حمل‌ونقل را کاهش داد.

همانطور که در جدول ۴ اشاره شده است، مدل استوار، راه‌حلی با کیفیت بالاتر و انحراف معیارهای کمتر از مدل قطععی را به دست می‌آورد. در همه مسائل، رویکرد استوار بر رویکرد قطععی با توجه به میانگین ارزش تابع هدف غلبه می‌کند. همچنین، با توجه به انحراف معیار، رویکرد استوار بر مسئله  $۱۰ * ۱۰ * ۶$  با  $۱۰ * ۱۰ * ۶$  با عدم قطعیت  $\rho = ۱$  و  $\rho = ۰/۲$  و مسئله  $۹ * ۱۵ * ۱۵$  با عدم قطعیت  $\rho = ۰/۲$  و  $\rho = ۰/۵$  و مسئله  $۱۲ * ۲۰ * ۲۰$  با عدم قطعیت  $\rho = ۰/۲$

جدول ۵. تحلیل حساسیت پارامترهای تقاضا در شرایط عدم قطعیت.

پارامتر	۲ برابر شدن پارامتر	۴ برابر شدن پارامتر	۵/۰ شدن پارامتر
$DD_k$	Integer infeasible	Integer infeasible	$۱/۷۹۲۹۴۵ E + ۸$
$RD_k$	Integer infeasible	Integer infeasible	$۳/۳۵۲۰۹۸ E + ۸$

جدول ۶. تحلیل حساسیت پارامترهای ظرفیت در شرایط عدم قطعیت.

پارامتر	۲ برابر شدن پارامتر	۴ برابر شدن پارامتر	۵/۰ شدن پارامتر
$KK_i$	$۳/۳۹۸۰۶۰ E + ۸$	$۳/۳۹۵۱۹۴ E + ۸$	Integer infeasible
$Capd_j$	$۳/۴۱۲۱۳۸ E + ۸$	$۳/۴۱۲۱۳۸ E + ۸$	Integer infeasible
$Capc_v$	$۳/۴۲۱۵۳۵ E + ۸$	$۳/۴۱۶۰۴۸ E + ۸$	Integer infeasible
$C$	$۳/۴۳۴۳۹۸ E + ۸$	$۳/۴۳۴۳۹۸ E + ۸$	$۳/۴۳۴۳۹۸ E + ۸$

جدول ۷. تحلیل حساسیت پارامترهای مربوط به هزینه و درآمد در شرایط عدم قطعیت.

پارامتر	۲ برابر شدن پارامتر	۴ برابر شدن پارامتر	۵/۰ شدن پارامتر
$FP_i$	$۳/۴۳۴۴۴۸ E + ۸$	$۳/۴۳۴۵۴۸ E + ۸$	$۳/۴۳۴۳۷۴ E + ۸$
$FD_j$	$۳/۴۳۴۴۱۶ E + ۸$	$۳/۴۳۴۴۵۲ E + ۸$	$۳/۴۳۴۳۸۹ E + ۸$
$FC_i$	$۳/۴۳۴۴۱۸ E + ۸$	$۳/۴۳۴۴۵۸ E + ۸$	$۳/۴۳۴۳۸۸ E + ۸$
$CP_{ij}$	$۵/۰۹۹۹۶۵ E + ۸$	$۸/۴۳۵۲۷۶ E + ۸$	$۲/۵۹۷۴۵۲ E + ۸$
$CD_{jk}$	$۵/۰۳۹۷۷۶ E + ۸$	$۸/۲۴۷۰۸۹ E + ۸$	$۲/۶۲۷۵۴۸ E + ۸$
$CC_{kl}$	$۳/۶۴۷۶۷۵ E + ۸$	$۴/۰۷۸۰۳۸ E + ۸$	$۳/۳۲۴۰۲۸ E + ۸$
$CN_{ti}$	$۳/۴۹۲۰۳۲ E + ۸$	$۳/۴۹۲۰۳۲ E + ۸$	$۳/۴۹۲۰۳۲ E + ۸$
$CQ_i$	$۳/۴۳۹۰۰۰ E + ۸$	$۳/۴۴۸۲۰۲ E + ۸$	$۳/۴۳۲۰۹۸ E + ۸$
$CR_l$	$۳/۴۳۴۸۵۸ E + ۸$	$۳/۴۳۵۷۷۹ E + ۸$	$۳/۴۳۴۱۶۸ E + ۸$
$CS_i$	$۳/۴۳۸۵۳۹ E + ۸$	$۳/۴۴۶۸۲۲ E + ۸$	$۳/۴۳۲۳۳۲ E + ۸$
$CT_i$	$۳/۴۳۴۸۵۸ E + ۸$	$۳/۴۳۵۷۷۹ E + ۸$	$۳/۴۳۴۱۶۸ E + ۸$
$SR_{ti}$	$۳/۱۰۱۴۹۳ E + ۸$	$۲/۲۱۵۵۲۳ E + ۸$	$۳/۴۹۲۰۳۲ E + ۸$

در پژوهش‌های آینده می‌توان مدل برنامه‌ریزی استوار پیشنهادی را در توسعه دیگر مدل‌های زنجیره تأمین حلقه بسته برای کنترل استواری تحت شرایط عدم قطعیت به کار برد. همچنین، می‌توان با تعیین یک سطح حداقل و حداکثر سطح ظرفیت مجاز، سطوح بهینه ظرفیت را به صورت پیوسته لحاظ نمود. همچنین، در مدل می‌توان ماهیت تسهیلات را تک لایه‌ای و چند لایه‌ای، تعداد محصولات را به صورت چند محصولی و نیز دوره‌های برنامه‌ریزی را به صورت چند دوره‌ای در نظر گرفت. پیشنهاد می‌شود، اهداف دیگری از جمله حداکثر کردن رضایت مشتریان و تأثیر بعد اجتماعی برای مدل صنعت نان در نظر گرفته شود. همچنین، از آنجایی که مسائل طراحی شبکه زنجیره تأمین از نوع مسائل NP-hard هستند، الگوریتم ژنتیک به منظور حل مدل در مسائل بزرگ پیشنهاد می‌شود.

## نمادها

### • اندیس‌ها و مجموعه‌های مدل

- $I$ : مجموعه‌ای از مراکز (مکان‌های) بالقوه برای تولیدکنندگان نان صنعتی؛
- $J$ : مجموعه‌ای از مراکز (مکان‌های) بالقوه برای مراکز توزیع نان صنعتی؛
- $k$ : مجموعه مراکز مشتریان؛
- $L$ : مجموعه‌ای از مراکز (مکان‌های) بالقوه برای مراکز جمع‌آوری/بازرسی نان صنعتی.

### • پارامترها

- $DD_k$ : تقاضای مشتری منطقه  $k$ ؛
- $RD_k$ : مقدار نان برگشتی منطقه  $k$ ؛
- $KK_i$ : ظرفیت بالقوه تولید کننده در مراکز  $i$ ؛
- $rc$ : نرخ دفع نان برگشتی در مراکز جمع‌آوری/بازرسی  $i$ ؛
- $rp$ : نرخ دفع نان برگشتی در تولیدکننده  $j$ ؛
- $FP_i$ : هزینه ثابت استقرار تولیدکننده  $i$ ؛
- $FD_j$ : هزینه ثابت استقرار مراکز توزیع  $j$ ؛
- $FC_l$ : هزینه ثابت استقرار مراکز جمع‌آوری/بازرسی  $l$ ؛
- $CP_{ij}$ : هزینه تولید یک واحد نان در مراکز تولید  $i$  به همراه حمل یک واحد نان از مراکز تولید  $i$  به مراکز توزیع  $j$ ؛
- $CD_{jk}$ : هزینه انبارداری یک واحد نان در مراکز توزیع  $j$  و انتقال آن از مراکز توزیع به مشتری  $k$ ؛

جنبه‌های مختلف مانند تولید آرد یا غذا برای دامداری استفاده کرد. براساس دلایل ذکر شده، جریان‌های معکوس نقش مهمی در این صنعت ایفا می‌کنند که باید در فرایند تصمیم‌گیری مورد توجه قرار گیرد. در این پژوهش، مسئله طراحی شبکه زنجیره تأمین حلقه بسته چندهدفه تحت شرایط عدم قطعیت برای استفاده از منافع بازیافت نان صنعتی برگشتی بررسی گردید. به این منظور، یک مدل برنامه‌ریزی عدد صحیح مختلط برای طراحی مسئله زنجیره تأمین نان صنعتی توسعه داده شد که تصمیم‌های مکان‌یابی و تخصیص را تعیین می‌کند. برای این منظور، ابتدا فرض شد همه پارامترها به صورت قطعی باشند و در حالت اطمینان کامل قرار داریم، از آنجایی که در دنیای واقعی با عدم قطعیت مواجهه بوده و نمی‌توان همه موارد را به صورت قطعی پیش‌بینی کرد، برخی از پارامترها از جمله تقاضا، هزینه‌های تولید، انبارداری، حمل‌ونقل و درآمد حاصل از محصولات برگشتی و نیز اثرات نامطلوب زیست محیطی و صرفه جویی زیست محیطی به صورت غیرقطعی در نظر گرفته شد و مدل براساس روش بهینه‌سازی استوار حل گردید و نتایج آن مورد بررسی قرار گرفت. سپس مدل در هر دو حالت قطعی و عدم قطعیت با یکدیگر مقایسه شد. در ادامه مسئله در اندازه‌های مختلف و تحت سه عدم قطعیت متفاوت و با روش تریابی و هسینی حل شد. با استفاده از نتایج حاصل از میانگین توابع هدف می‌توان نتیجه گرفت که در همه موارد، حالت استوار جواب‌های بهتر و کاراتری نسبت به جواب‌های قطعی دارد.

- $CC_{kl}$ : هزینه حمل و نقل یک واحد نان برگشتی از مشتری  $k$  به مراکز جمع‌آوری / بازرسی  $l$ ؛
- $CN_{li}$ : هزینه حمل و نقل یک واحد نان برگشتی از مراکز جمع‌آوری / بازرسی  $l$  به تولیدکننده  $i$ ؛
- $CQ_l$ : هزینه یک واحد تولید مجدد نان در مراکز جمع‌آوری / بازرسی  $l$ ؛
- $CR_l$ : هزینه یک واحد تخلیه نان در مراکز جمع‌آوری / بازرسی  $l$ ؛
- $CS_i$ : هزینه یک واحد تولید مجدد نان در مراکز تولید  $i$ ؛
- $CT_i$ : هزینه یک واحد تخلیه نان در مراکز تولید  $i$ ؛
- $Capd_j$ : ظرفیت مراکز توزیع نان  $j$ ؛
- $Capc_l$ : ظرفیت مراکز جمع‌آوری / بازرسی نان  $l$ ؛
- $C$ : ظرفیت کامیون موجود؛
- $CM_{li}$ : مجموع هزینه‌های هر واحد بازسازی و توزیع در مراکز جمع‌آوری / بازرسی  $l$  و هزینه‌های هر واحد تولید مجدد و توزیع در مراکز تولید  $i$  و هزینه‌های حمل و نقل یک واحد نان برگشتی از مراکز جمع‌آوری / بازرسی  $l$  به تولیدکننده  $i$ ؛
- $SR_{li}$ : مجموع درآمد حاصل از فروش نان برگشتی؛
- $efm_i$ : اثرات نامطلوب زیست محیطی استقرار مراکز تولید نان  $i$ ؛
- $efd_j$ : اثرات نامطلوب لوب زیست محیطی استقرار مراکز توزیع نان  $j$ ؛
- $efc_l$ : اثرات نامطلوب زیست محیطی استقرار مراکز جمع‌آوری / بازرسی نان  $l$ ؛
- $etp_{ij}$ : اثرات نامطلوب زیست محیطی حمل یک واحد نان از تولیدکننده  $i$  به مراکز توزیع  $j$ ؛
- $etd_{jk}$ : اثرات نامطلوب زیست محیطی حمل یک واحد نان از مراکز توزیع  $j$  به مشتری  $k$ ؛
- $etk_{kl}$ : اثرات نامطلوب زیست محیطی حمل یک واحد نان از مشتری  $k$  به مراکز جمع‌آوری / بازرسی  $l$ ؛
- $etci_i$ : اثرات نامطلوب زیست محیطی حمل یک واحد نان از مراکز جمع‌آوری / بازرسی  $l$  به مراکز تولید  $i$ ؛
- $eti_i$ : صرفه‌جویی زیست محیطی ناشی از نان برگشتی از مراکز جمع‌آوری / بازرسی  $l$  به مراکز تولید  $i$ .
- مفروضات متغیرهای تصمیم
  - متغیرهای تصمیم
- $P_i$ : اگر مراکز تولید ایجاد شده باشد یک و در غیر این صورت صفر؛
- $D_j$ : اگر مراکز توزیع ایجاد شده باشد یک و در غیر این صورت صفر؛
- $Z_l$ : اگر مراکز جمع‌آوری / بازرسی ایجاد شده باشد یک و در غیر این صورت صفر.
- متغیرهای عدد صحیح و پیوسته
- $X_{ij}$ : مقدار نان منتقل شده از تولیدکننده  $i$  به مراکز توزیع  $j$ ؛
- $Y_{jk}$ : مقدار نان منتقل شده از مراکز توزیع  $j$  به مشتری  $k$ ؛
- $W_{kl}$ : مقدار نان منتقل شده از مشتری  $k$  به مراکز جمع‌آوری / بازرسی  $l$ ؛
- $V_i$ : مقدار نان منتقل شده از مراکز جمع‌آوری / بازرسی  $l$  به مراکز تولید  $i$ ؛
- $M$ : عدد بزرگ.

## پانویس‌ها

1. Epistemic Uncertainty
2. Mixed Integer Linear Programming (MILP)
3. Benders Decomposition
4. Tractable Form
5. Fuzzy and

## منابع (References)

1. FAO., 2016. *Mediterra 2016: Zero waste in the Mediterranean Natural Resources, Food and Knowledge*. Chapter 13: Consumer Behaviour With Respect to Food Losses and Waste. Albusu, L.M.
2. Azadbakht, N., Khosravinezhad, K. and Trahir, M.J., 2008. Evaluation of aflatoxin contamination of bread waste in Lorestan province. *Yafte*, 10, pp.87-96. [In Persian].
3. Soleymani, M. and Omid, H., 2013. Comparative study of the bread industry of Malaysia and Iran (with emphasis on the educational system). *Business Reviews*. 11(59), pp.47-58. [In Persian].
4. Javanbakht, H., Javanbakht, K. and Ansari, F., 2017. Effects of dry bread waste on environmental pollution. *International Conference on New Ideas in Agriculture, Environment and Tourism*, Ardabil. [In Persian].
5. Pashae, V. and Haghazari, S., 2019. Effect of fermentation and infrared and traditional baking methods on reducing aflatoxin levels in Lavash bread. *Food Industry Research*, 29(1), pp.43-52. [In Persian].
6. Karami, F., Omrani, Gh.A., Shoeybi, Sh., Tabaraei, B., Rahimifard, N. and Arjmandi, R., 2012. Investigation of fungal contamination of recycled bread waste in areas 6 and 7 of Tehran Municipality. *Iranian Journal of Medical Microbiology*, 6(3), pp.52-58. [In Persian].
7. Azizi, M.H. 2002., Investigating strategies to reduce waste and improve bread quality. Department of Food Science and Technology, Faculty of Agriculture, Tarbiat Modares University, Institute of Nutritional Research and Food Industry. [In Persian].
8. Linton, J.D., Klassen, R. and Jayaraman, V., 2007. Sustainable supply chains: An introduction. *Journal of Operations Management*, 25(6), pp.1075-1082. <https://doi.org/10.1016/j.jom.2007.01.012>.
9. Izadpanah, N., Mohamadi, V. and Aghayarmakouee, N., 2018. A review of bread waste (the need to reduce bread waste to increase productivity). *Eleventh International Conference on Accounting and Management and Eighth Conference on Entrepreneurship and Open Innovation*. [In Persian].
10. Winkler, H., 2011. Closed-loop production systems-A sustainable supply chain approach. *CIRP Journal of Manufacturing Science and Technology*, 4(3), pp.243-246. <https://doi.org/10.1016/j.cirpj.2011.05.001>.

11. Vahdani, B., Razmi, J. and Tavakkoli-Moghaddam, R., 2012. Fuzzy possibilistic modeling for closed loop recycling collection networks. *Environmental Modeling & Assessment*, 17(6), pp.623-637. <https://doi.org/10.1007/s10666-012-9313-7>.
12. Willows, R., Reynard, N., Meadowcroft, I. and Connell, R., 2003. Climate adaptation: Risk, uncertainty and decision-making. UKCIP Technical Report. UK Climate Impacts Programme.
13. Mula, J., Poler, R. and Garcia-Sabater, J.P., 2007. Material requirement planning with fuzzy constraints and fuzzy coefficients. *Fuzzy Sets and Systems*, 158(7), pp.783-793. <https://doi.org/10.1016/j.fss.2006.11.003>.
14. Chouinard, M., D'Amours, S. and Ait-Kadi, D., 2008. A stochastic programming approach for designing supply loops. *International Journal of Production Economics*, 113(2), pp.657-677. <https://doi.org/10.1016/j.ijpe.2007.10.023>.
15. Sabri, E.H. and Beamon, B.M., 2000. A multi-objective approach to simultaneous strategic and operational planning in supply chain design. *Omega*, 28(5), pp.581-598 <https://doi.org/10.1016/j.apm.2010.07.013>.
16. Snyder, L.V., 2006. Facility location under uncertainty: A review. *IIE Transactions*, 38(7), pp.547-564. <https://doi.org/10.1080/07408170500216480>.
17. Neto, J.Q.F., Bloemhof-Ruwaard, J.M., van Nunen, J.A. and van Heck, E., 2008. Designing and evaluating sustainable logistics networks. *International Journal of Production Economics*, 111(2), pp.195-208. <https://doi.org/10.1016/j.ijpe.2006.10.014>.
18. Dehghanian, F. and Mansour, S., 2009. Designing sustainable recovery network of end-of-life products using genetic algorithm. *Resources, Conservation and Recycling*, 53(10), pp.559-570. <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2009.04.007>.
19. Amin, S.H., Zhang, G. and Akhtar, P., 2017. Effects of uncertainty on a tire closed-loop supply chain network. *Expert Systems with Applications*, 73, pp.82-91. <https://doi.org/10.1016/j.eswa.2016.12.024>.
20. Mulvey, J.M., Vanderbei, R.J. and Zenios, S.A., 1995. Robust optimization of large-scale systems. *Operations Research*, 43(2), pp.264-281. <https://doi.org/10.1287/opre.43.2.264>.
21. Pishvaei, M.S., Rabbani, M. and Torabi, S.A., 2011. A robust optimization approach to closed-loop supply chain network design under uncertainty. *Applied Mathematical Modelling*, 35(2), pp.637-649. <https://doi.org/10.1016/j.apm.2010.07.013>.
22. Zhalechian, M., Tavakkoli-Moghaddam, R., Zahiri, B. and Mohammadi, M., 2016. Sustainable design of a closed-loop location-routing-inventory supply chain network under mixed uncertainty. *Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review*, 89, pp.182-214. <https://doi.org/10.1016/j.tre.2016.02.011>.
23. Lieckens, K. and Vandaele, N., 2007. Reverse logistics network design with stochastic lead times. *Computers and Operations Research*, 34(2), pp.395-416. <https://doi.org/10.1016/j.cor.2005.03.006>.
24. d'Amore, F. and Bezzo, F., 2016. Strategic optimisation of biomass-based energy supply chains for sustainable mobility. *Computers & Chemical Engineering*, 87, pp.68-81. <https://doi.org/10.1016/j.compchemeng.2016.01.003>.
25. Santibañez-Aguilar, J.E., Morales-Rodriguez, R., González-Campos, J.B. and Ponce-Ortega, J.M., 2016. Stochastic design of biorefinery supply chains considering economic and environmental objectives. *Journal of Cleaner Production*, 136, pp.224-245. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2016.03.168>.
26. Safaei, A.S., Roozbeh, A. and Paydar, M.M., 2017. A robust optimization model for the design of a cardboard closed-loop supply chain. *Journal of Cleaner Production*, 166, pp.1154-1168. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2017.08.085>.
27. Shahparvari, S., Chhetri, P., Chan, C. and Asefi, H., 2018. Modular recycling supply chain under uncertainty: A robust optimisation approach. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 96(1-4), pp.915-934. <https://doi.org/10.1007/s00170-017-1530-4>.
28. Shi, J., Liu, Z., Tang, L. and Xiong, J., 2017. Multi-objective optimization for a closed-loop network design problem using an improved genetic algorithm. *Applied Mathematical Modelling*, 45, pp.14-30. <https://doi.org/10.1016/j.apm.2016.11.004>.
29. Hamidieh, A., Naderi, B., Mohammadi, M. and Fazli-Khalaf, M., 2017. A robust possibilistic programming model for a responsive closed loop supply chain network design. *Cogent Mathematics*, 4(1), 1329886. <https://doi.org/10.1080/23311835.2017.1329886>.
30. Polo, A., Pena, Ñ, Munoz, Ñ., Canón, Á. and Escobar, J.W., 2019. Robust design of a closed-loop supply chain under uncertainty conditions integrating financial criteria. *Omega*, 88, pp.110-132. <https://doi.org/10.1016/j.omega.2018.09.003>.
31. Pant, K., Yadav, V.S. and Singh, A.R., 2021. Design of multi-tier multi-time horizon closed-loop supply chain network with sustainability under uncertain environment for Indian paper industry. *International Journal of Sustainable Engineering*, 14(2), pp.107-122. <https://doi.org/10.1080/19397038.2020.1774817>.
32. Jouzdani, J. and Govindan, K., 2021. On the sustainable perishable food supply chain network design: A dairy products case to achieve sustainable development goals. *Journal of Cleaner Production*, 278, Article 123060. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.123060>.
33. Ben-Tal, A. and Nemirovski, A., 1998. Robust convex optimization. *Mathematics of Operations Research*, 23(4), pp.769-805. <https://doi.org/10.1287/moor.23.4.769>.
34. Soyster, A., 1973. Convex programming with set-inclusive constraints and applications to inexact linear programming. *Operations Research*, 21(5), pp.1154-1157. <https://doi.org/10.1287/opre.21.5.1154>.
35. Rahimi, E., Paydar, M. M., Mahdavi, I., Jouzdani, J. and Arabsheybani, A., 2018. A robust optimization model for multi-objective multi-period supply chain planning under uncertainty considering quantity discounts. *Journal of Industrial and Production Engineering*, <https://doi.org/10.1080/21681015.2018.1441195>.
36. Zimmermann, H.J., 1978. Fuzzy programming and linear programming with several objective functions. *Fuzzy Sets and Systems*, 1(1), pp.45-55. [https://doi.org/10.1016/0165-0114\(78\)90031-3](https://doi.org/10.1016/0165-0114(78)90031-3).
37. Zadeh, L.A., 1978. Fuzzy sets as a basis for a theory of possibility. *Fuzzy Sets and Systems*, 1(1), pp.3-28. [https://doi.org/10.1016/0165-0114\(78\)90029-5](https://doi.org/10.1016/0165-0114(78)90029-5).

38. Werners, B., 1987. An interactive fuzzy programming system. *Fuzzy Sets and Systems*, 23(1), pp.131-147. [https://doi.org/10.1016/0165-0114\(87\)90105-9](https://doi.org/10.1016/0165-0114(87)90105-9).
39. Selim, H. and Ozkarahan, I., 2008. A supply chain distribution network design model: An interactive fuzzy goal programming-based solution approach. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 36(3), pp.401-418. <https://doi.org/10.1007/s00170-006-0842-6>.
40. Torabi, S.A. and Hassini, E., 2008. An interactive possibilistic programming approach for multiple objective supply chain master planning. *Fuzzy Sets and Systems*, 159(2), pp.193-214. <https://doi.org/10.1016/j.fss.2007.08.010>.
41. Mirakhorli, A., 2014. Fuzzy multi-objective optimization for closed loop logistics network design in bread-producing industries. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 70(1-4), pp.349-362. <https://doi.org/10.1007/s00170-013-5264-7>.
42. Ho, J.C., Wijesundra, N.E. and Chou, S.K., 1986. Energy analysis applied to food processing. *Pergamon Journals Ltd*, pp.887-892. [https://doi.org/10.1016/0360-5442\(86\)90008-3](https://doi.org/10.1016/0360-5442(86)90008-3).