



طراحی شبکه توزیع مواد غذایی فاسدشدنی تحت عدم قطعیت تقاضا، طول عمر و برگشت محصول

الهه جعفرنژاد^{۱*}، سیدکمال چهارسوقی^۱

۱ _ دانشکده مهندسی صنایع و سیستم‌ها، دانشگاه تربیت مدرس، تهران، ایران.

چکیده

طراحی شبکه توزیع محصولات غذایی فاسدشدنی به دلیل فسادپذیری، عدم قطعیت تقاضا و برگشت محصول، یکی از مسائل مهم در مدیریت زنجیره تأمین است. هدف این پژوهش، ارائه یک مدل ریاضی چندهدفه برای طراحی شبکه توزیع مواد غذایی فاسدشدنی با در نظر گرفتن ابعاد اقتصادی، زیست‌محیطی و اجتماعی است. اهداف مدل شامل کمینه‌سازی هزینه‌های اقتصادی، کاهش مصرف سوخت و انتشار کربن در بعد زیست‌محیطی و افزایش اشتغال و توسعه منطقه‌ای در بعد اجتماعی است. مدل پیشنهادی با لحاظ عدم قطعیت تقاضا و نرخ برگشت محصول و همچنین استفاده از توزیع وایبل برای مدل‌سازی طول عمر محصولات، به صورت یک مدل برنامه‌ریزی عدد صحیح مختلط چنددوره‌ای فرموله شد. برای حل مدل، از دو روش برنامه‌ریزی آرمانی و محدودیت افسیلون تکامل‌یافته استفاده و عملکرد آن‌ها با بهره‌گیری از شاخص MID مقایسه شد. به منظور اعتبارسنجی، مدل در شرکت صنایع غذایی نامی نو پیاده‌سازی شد. نتایج نشان داد روش محدودیت افسیلون تکامل‌یافته نسبت به برنامه‌ریزی آرمانی، جواب‌های کارتر و متوازن‌تری ارائه می‌دهد. همچنین تحلیل حساسیت بیانگر آن بود که افزایش تقاضا و نرخ برگشت محصول موجب افزایش هزینه‌های شبکه و پیامدهای زیست‌محیطی می‌شود، در حالی که شاخص اجتماعی تنها در صورت نیاز به احداث کارخانه جدید تغییر می‌یابد. نتایج مطالعه موردی نیز نشان داد مدل پیشنهادی با انتخاب مناسب مکان کارخانه، تخصیص بهینه جریان محصولات و انتخاب وسیله حمل‌ونقل، ضمن کاهش هزینه‌ها و انتشار آلاینده‌ها، سطح خدمت‌رسانی و عملکرد اجتماعی شبکه را بهبود می‌بخشد. بنابراین، مدل ارائه‌شده می‌تواند به عنوان ابزاری مؤثر برای تصمیم‌گیری‌های راهبردی در طراحی شبکه توزیع محصولات غذایی فاسدشدنی مورد استفاده قرار گیرد.

اطلاعات مقاله

واژگان کلیدی:

طراحی شبکه توزیع، زنجیره تأمین، عدم قطعیت، مواد غذایی فاسدشدنی، برنامه‌ریزی آرمانی، محدودیت افسیلون تکامل‌یافته



الهه جعفرنژاد (نویسنده مسئول)

پست الکترونیک: jafarnejad.e@modares.ac.ir

۱_ مقدمه

شبکه توزیع، فاکتور اصلی سودآوری زنجیره تأمین به شمار می‌رود چرا که به طور مستقیم بر هزینه‌ها اثر می‌گذارد و سهم قابل توجهی (حدود ۳۰٪) از بهای تمام شده محصول نهایی را شامل می‌شود. به همین دلیل، شرکت‌های صنعتی که دارای شبکه‌های زنجیره تأمین هستند، باید مورد توجه ویژه قرار گیرد. توزیع در زنجیره تأمین، زنجیره‌ای از فعالیت‌ها است که

محصول را از تامین کننده به مشتری نهایی می‌رساند که شامل اقداماتی از جمله انتخاب مکان کارخانه‌های تولید و انبارهای توزیع و هم چنین تعیین بهترین روش برای توزیع محصولات از کارخانه‌ها به انبارها و از انبارها به مشتریان است. (موسی‌زاده و پیرتاج، ۱۴۰۰)

در سال‌های اخیر، با رشد سریع صنایع غذایی و تغییرات اساسی در عادات غذایی و سبک زندگی مردم، آگاهی از مواد

غذایی برای بیشتر مصرف‌کنندگان افزایش یافته است. مشتریان مدرن بیشتر نگران ایمنی و کیفیت غذایی که می‌خورند هستند. درک می‌شود که ایمنی غذایی شامل غذایی است که فاقد ناخالصی‌ها و موادی باشد که ممکن است باعث رشد باکتری‌های مضر برای امنیت و زندگی افراد شود (Haji, et al., 2020). مدیریت زنجیره تأمین مواد غذایی به دلیل کاربرد بالای آن در صنعت از اهمیت بالایی برخوردار است. بررسی اقلام فسادپذیر در قالب زنجیره تأمین می‌تواند نیازهای بخشی از صنایع که با این اقلام در ارتباط هستند را برطرف کند (مشهدی و توکلی مقدم، ۱۴۰۰). کالاهای فاسدشدنی ممکن است به مدت طولانی در انبار نگهداری نشوند و در حین حمل و نقل از یک ردیف زنجیره تأمین به دیگری خراب شوند. فسادپذیری این‌گونه محصولات وابسته به زمان است یعنی احتمال تلف شدن با گذشت زمان افزایش می‌یابد. فساد با گذشت زمان برای بسیاری از محصولات در دنیای واقعی رخ می‌دهد و از آنجا که هزینه‌های اضافی بر سیستم موجودی تحمیل می‌کند، در صورت نادیده گرفته شدن، در فرآیند تصمیم‌گیری خلا ایجاد کرده و استراتژی سفارش کالا را به بیراهه می‌کشاند (Jouzani & Govindan, 2021).

مدیریت زنجیره تأمین مواد غذایی فاسدشدنی به دلیل عمر کوتاه محصول و نامنظم بودن تقاضا، یک وظیفه چالش برانگیز است. با وجود جمعیت گسترده از ذینفعان در فرآیند تولید، توزیع و فروش، مدیریت این زنجیره تأمین پیچیده می‌شود و بنابراین به خصوص در مواجهه با بحران‌ها، صدمه پذیر است (Zhu & Krikke, 2020).

۱۵ درصد از کل مصرف انرژی جهانی به سیستم‌های خنک کننده و زنجیره‌های سرد نسبت داده می‌شود از طرفی دیگر، ۴۰ درصد محصولات غذایی با وسایل نقلیه دارای یخچال حمل می‌شوند (Jouzani & Govindan, 2021).

۲- تعاریف و چارچوب مفهومی

روند تصمیم‌گیری در مورد یافتن تأمین‌کننده بهینه با کیفیت لازم محصولات نهایی، قیمت خرید، میزان فسادپذیری و زمان صرف شده در مراحل تحویل و قرنطینه بسیار پیچیده و بسیار مهم است، اما در معرض خطر نیز قرار دارد. همه مواد لازم باید به استانداردهای فوق‌العاده با کیفیت بالا برسند. اگر مواد

اولیه دور از محل کارخانه‌های تولید مرکزی خریداری شود، توزیع و قرنطینه می‌تواند چندین هفته طول بکشد تا مواد در مرحله تولید نهایی استفاده شوند، به این معنی که مواد در معرض خطر بالایی برای از بین رفتن هستند این امر به ویژه هنگامی مورد توجه قرار می‌گیرد که با مواد گران قیمت با زمان تحویل طولانی و میزان فسادپذیری زیاد سروکار دارند (Kovacic, et al., 2015). در سال‌های اخیر، با رشد سریع صنایع غذایی و تغییرات اساسی در عادات غذایی و سبک زندگی مردم، آگاهی از مواد غذایی برای بیشتر مصرف‌کنندگان افزایش یافته است. مشتریان مدرن بیشتر نگران ایمنی و کیفیت غذایی که می‌خورند هستند. درک می‌شود که ایمنی غذایی شامل غذایی است که فاقد ناخالصی‌ها و موادی باشد که ممکن است باعث رشد باکتری‌های مضر برای امنیت و زندگی افراد شود (Haji, et al., 2020).

یکی از اهداف اصلی در توزیع محصولات فاسدشدنی یا به ویژه در زنجیره‌های تأمین مواد غذایی، تازه نگه داشتن آن‌ها در حین رساندنشان به مناطق تقاضا است. این موضوع تأثیر مستقیمی بر پاسخگویی شبکه دارد. از آنجا که محصولات به زمان حساس هستند، ارزش آن‌ها با گذشت زمان کاهش می‌یابد (Musavi & Bozorgi-Amiri, 2017). زنجیره تأمین محصولات فاسدشدنی دارای ویژگی‌های خاصی از قبیل عمر کوتاه، شرایط نگهداری خاص، تجهیزات و تسهیلات ویژه جهت نگهداری، تولید، توزیع است. بر اساس مدیریت زنجیره تأمین مواد غذایی، این نوع مواد باید قبل از فاسدشدن به فروش رفته و همین‌طور حداکثر سود حاصل شود. مدیریت زنجیره تأمین غذایی (FSCM) به دلیل مقیاس بالای آن در صنعت، مقدار اتلاف مواد غذایی در جهان و رابطه بین اتلاف مواد غذایی و سوء تغذیه جهانی از اهمیت بالایی برخوردار است (مشهدی و توکلی مقدم، ۲۰۲۱). تشخیص داده شد که مصرف انرژی و مقدار انتشار از مهم‌ترین و رایج‌ترین شاخص‌های تأثیرات زیست محیطی هستند. به اضافه اینکه، نشان داده شده که بین مصرف انرژی و انتشار، یک رابطه نزدیک وجود دارد (soytas, et al., 2007).

این شهرها علاوه بر نقش کلیدی در تأمین بازار مصرف، گزینه‌های بالقوه‌ای برای استقرار مراکز کارخانه نیز محسوب می‌شوند. در این میان، به دلیل وجود کارخانه‌های مرکزی در تهران و اصفهان، هزینه احداث کارخانه در این دو شهر برابر با صفر در نظر گرفته شده است، در حالی که در سایر شهرها احداث کارخانه مستلزم صرف هزینه‌های سرمایه‌گذاری خواهد بود.

دو گروه محصول انتخاب‌شده برای این مطالعه شامل:

- سالاد الویه کالباس و مرغ ۲۰۰ گرمی
- سالاد الویه کالباس و مرغ ۵۰۰ گرمی

این محصولات به دلیل تقاضای بالا، حساسیت در شرایط نگهداری و نقش کلیدی در زنجیره توزیع شرکت انتخاب شده‌اند.

در زنجیره تأمین نامی‌نو، مانند زنجیره تأمین محصولات فاسدشدنی دیگر، از وسایل نقلیه یخچال‌دار استفاده می‌شود. چهار نوع وسیله نقلیه در این مطالعه لحاظ گردیده است:

- پراید وانت یخچال‌دار
- نیسان یخچال‌دار
- کامیون ایسوزو ۶ تن
- کامیون ۱۰ تن

این وسایل نقلیه با ظرفیت‌های مختلف امکان تأمین تقاضا در مقیاس‌های متفاوت را فراهم می‌سازند و انتخاب آن‌ها بستگی به حجم تقاضا و مسیر توزیع دارد.

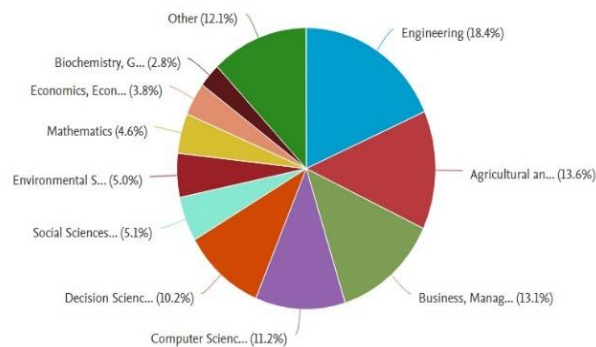
با توجه به اینکه میزان تقاضای محصولات فاسدشدنی متأثر از شرایط فصلی است، در این مطالعه دوره زمانی شامل چهار فصل سال در نظر گرفته شده است:

- بهار
- تابستان
- پاییز
- زمستان

این تقسیم‌بندی امکان بررسی تغییرات تقاضا و استراتژی‌های توزیع متناسب با هر فصل را فراهم می‌نماید.

۴- اهداف تحقیق

زنجیره تأمین مواد غذایی، دنیایی پویا و در حال تحول است. در این میان، تولیدکنندگان و توزیع‌کنندگان برای بقا و



نگاره ۱- میزان توجه به موضوع به تفکیک حوزه ها
(<https://www.scopus.com/>)

۳- معرفی و تحلیل مطالعه موردی

شرکت نامی‌نو در سال ۱۳۷۹ تأسیس شد و با ابداع تولید صنعتی سالاد الویه در سال ۱۳۸۱ به صورت رسمی فعالیت خود را آغاز کرد. علت اصلی حرکت به سمت تولید صنعتی سالاد الویه، تصمیم سازمان غذا و دارو مبنی بر غیرقانونی بودن عرضه سالادهای الویه فله‌ای در بازار بود. این امر مدیرعامل شرکت را بر آن داشت تا با رویکردی نوآورانه، تولید این محصول را به صورت صنعتی و استاندارد وارد بازار نماید. در ادامه، فعالیت شرکت با متنوع‌سازی محصولات ادامه یافت. امروزه منوی نامی‌نو شامل انواع خوراکی‌های سرد آماده مصرف (سالاد الویه، سالاد ماکارونی و سالاد مرغ)، انواع خوراکی‌های گرم آماده مصرف (خوراک سوسیس و سیب‌زمینی، خوراک بندری و کشک و بادمجان)، انواع ساندویچ‌ها (باگت، کلاب و مک) و انواع سس‌ها (کچاپ، کچاپ تند، مایونز، مایونز کم‌چرب و فرانسوی) است. محصولات نامی‌نو از طریق ناوگان گسترده حمل‌ونقل یخچالی این شرکت در سراسر کشور عرضه می‌شوند.

در این تحقیق شبکه زنجیره تأمین مورد بررسی شامل شش شهر اصلی به عنوان مقاصد تقاضا است که عبارت‌اند از:

- تهران
- اصفهان
- قم
- کرج
- مشهد
- ورامین

پیشرفت، همواره در تلاشند تا ضمن بهینه‌سازی هزینه‌ها، سطح خدمات خود را ارتقا دهند. از طرفی، تمایل روزافزون مصرف‌کنندگان به محصولات تازه، فشار مضاعفی را بر این شبکه وارد می‌کند. در چنین شرایطی، پیش‌بینی دقیق تقاضا و پاسخگویی سریع و انعطاف‌پذیر به آن، برای جلب رضایت مشتری و حفظ سهم بازار، از اهمیت زیادی برخوردار می‌شود. طراحی شبکه توزیع کارآمد برای مواد غذایی فاسد شدنی، چالشی پیچیده در طراحی شبکه توزیع صنایع غذایی است. در این میان، عدم قطعیت تقاضا و طول عمر و برگشت محصول، این چالش را دوچندان می‌کند. هدف این تحقیق، طراحی و بررسی یک مدل ریاضی برای مسئله طراحی شبکه توزیع مواد غذایی فاسد شدنی تحت عدم قطعیت تقاضا و طول عمر و برگشت محصول؛ مطالعه موردی: صنایع غذایی است.

۵- روش تحقیق

مسیر دستیابی به اهداف این مطالعه، مستلزم بهره‌گیری از یک روش‌شناسی منسجم و علمی است؛ به بیان دیگر، آنچه به یافته‌های یک پژوهش اعتبار می‌بخشد، صرفاً موضوع آن نیست، بلکه چگونگی اجرای فرآیند تحقیق است. بر این اساس، محقق با به کارگیری راهبردهای پژوهشی مناسب، زمینه اعتباربخشی به نتایج را فراهم می‌آورد. در این پژوهش، نخست عوامل مؤثر بر شبکه توزیع مواد غذایی فاسدشدنی، از طریق بررسی پیشینه مطالعات و نیز مشاوره و تبادل نظر با متخصصان صنعت، شناسایی و استخراج شد. در گام بعدی، با توجه به مبانی نظری و ویژگی‌های مسئله، مدل ریاضی تدوین گردید. از نظر هدف، این تحقیق در زمره مطالعات کاربردی قرار می‌گیرد و به توسعه یک مدل ریاضی با رویکرد برنامه‌ریزی عدد صحیح مختلط در حوزه طراحی شبکه توزیع، با تمرکز بر مطالعه موردی صنایع غذایی نامی‌نو می‌پردازد. در نهایت، مدل ارائه شده با استفاده از راه‌حل‌های چندهدفه، شامل روش برنامه‌ریزی آرمانی و روش محدودیت افسیلون توسعه‌یافته، حل و مورد تجزیه و تحلیل قرار گرفت.

۶- نوآوری تحقیق

این تحقیق یک مدل برنامه‌ریزی ریاضی را برای طراحی چند دوره پایداری شبکه توزیع مواد غذایی فاسدشدنی ارائه نمود و

دو مورد از محصول الویه نامی نو مورد مطالعه قرار گرفت. مدل با استفاده از روش محدودیت افسیلون تکامل یافته و برنامه ریزی آرمانی حل شد. با توجه به بررسی ادبیات مرتبط، طراحی شبکه توزیع مواد غذایی فسادپذیر با توجه به جنبه‌های پایداری باید به طور کامل‌تری بررسی شود. در این پژوهش، عدم اطمینان در طول عمر و تقاضا و برگشت محصول در نظر گرفته شده است. چندین محصول که از نظر میزان فاسدشدنی بودن و وزن با یک دیگر متفاوت هستند در نظر گرفته شده است. علاوه بر این، چندین ویژگی از وسایل نقلیه، از جمله مصرف سوخت و انتشار کربن، برای بررسی تأثیرات زیست محیطی آن‌ها در نظر گرفته شده است. یک ویژگی که در این پژوهش به آن پرداخته شده در حالی که قبلاً کمتر به آن پرداخته شده در نظر گرفتن چندین دوره زمانی و درج ارزش زمانی پول در محاسبات است. همچنین جهت اعتبارسنجی این پژوهش از داده‌های واقعی استفاده شده است.

۷- تعریف مسأله و مفروضات آن

با توجه به مسئله فوق در این قسمت مفروضات مسئله که در مدل‌سازی نشان داده خواهد شد. به طور واضح شرح داده می‌شود.

نخست مجموعه‌ای از فرضیه‌هایی که مدل بر اساس آن‌ها شکل می‌گیرد، بیان می‌شود و سپس مدل ریاضی برای بهینه‌سازی سه هدف، شامل تأثیرات اقتصادی، زیست‌محیطی و اجتماعی شبکه توزیع، ارائه خواهد شد.

- وابسته بودن فسادپذیری به دما و زمان
- مصرف سوخت وسایل نقلیه فقط به مسافت طی شده بستگی دارد.
- فرض بر این است چندین محصول با خواص فسادپذیری متفاوت وجود دارد یعنی محصولات با نرخ‌های متفاوت از بین می‌روند.
- کل هزینه شامل هزینه ثابت مکان تسهیلات برای کارخانه، خرید، حمل و نقل و هزینه‌های نگهداری است.
- تأثیر محیط زیست عملیات شبکه توزیع با محاسبه مقدار کل انرژی مصرفی ناوگان ارزیابی می‌شود.

• تاثیر اجتماعی عملیات توزیع با محاسبه اشتغال و توسعه منطقه ای ارزیابی می شود.

• طول عمر هر نوع محصول در هر دوره زمانی از توزیع وایبل پیروی می کند. تقاضا و برگشت محصول پارامترهای غیر قطعی هستند زیرا از بین رفتن محصولات فاسد شدنی یک فرایند تصادفی است و تقاضا و برگشت محصول برای محصولات در زمان های متفاوت بسته به شرایط با عدم قطعیت همراه است.

• فرض بر این است که همه انواع وسایل نقلیه مجهز به یخچال هستند که تصمیم گرفته می شود برای حمل محصولات از هر کارخانه به مراکز توزیع (شعب) استفاده شود.

۸_ نمادهای مدل

مجموعه ها، پارامترها و متغیرهای تصمیم مسئله به صورت زیر می باشند:

نگاره ۲_ مجموعه ها، پارامترها و متغیرهای مدل	
مجموعه ها	
$i \in \Delta = \{1, \dots, D\}$	فهرست مکان های بالقوه کارخانه
$j \in \iota = \{1, \dots, J\}$	فهرست برای مرکز توزیع (شعب)
$k \in \Phi = \{1, \dots, V\}$	فهرست برای انواع خودرو
$p \in \Pi = \{1, \dots, P\}$	فهرست محصولات
$t \in \psi = \{1, \dots, T\}$	فهرست برای دوره های زمانی
پارامترها	
F_i	هزینه ثابت افتتاح کارخانه در محل i
$\tilde{d}_{pjt}$	تعداد واحدهای محصول p مورد تقاضای مرکز توزیع (شعب) j در دوره t
R_{pjt}	ضریب بازگشت محصول p برگشتی مرکز توزیع (شعب) j در دوره t
τ_{ijt}^o	زمان سفر با فرض جریان آزاد از $DC\ i$ به مرکز توزیع (شعب) j در دوره t
$\tilde{l}_{pt}^R$	طول عمر p محصول در دوره t اگر توسط وسیله نقلیه با یخچال روشن حمل شود. توزیع $Weibull$ را با پارامترهای β_{pt}^R و δ_{pt}^R دنبال می کند
$\tilde{l}_{pt}^o$	طول عمر p محصول در دوره t اگر توسط وسیله نقلیه با یخچال خاموش حمل شود. توزیع $Weibull$ را با پارامترهای β_{pt}^o و δ_{pt}^o دنبال می کند.
C_{kt}	واحد هزینه حمل و نقل مسافت یک وسیله نقلیه نوع k در بازه زمانی t
w_p	وزن برای یک واحد محصول p

a_k	ظرفیت کل نوع خودرو k از نظر وزن بار
b_k	هزینه حمل و نقل ثابت نوع خودرو k
m_i	حداکثر ظرفیت $DC\ i$
ρ_t	نرخ بهره در بازه زمانی t
ϕ_{ijt}^o	جریان اساسی در بازه زمانی t از $DC\ i$ به مرکز توزیع (شعب) j
cap_{ij}	ظرفیت مسیر $DC\ i$ به مرکز توزیع (شعب) j
ω_k	وزن ازدحام ترافیک وسایل نقلیه از نوع k
ادامه پارامترها	
$dist_{ij}$	فاصله $DC\ i$ تا مرکز توزیع (شعب) j
u_k^R	هر واحد مصرف سوخت از نوع خودرو k
α_p^R	حداکثر قسمت مجاز از محصول با استفاده از یخچال از بین می رود
θ	ضریب تبدیل سوخت
π_p	بخشی از محصول p فاسد شده در DC
ad_p	حداکثر قسمت قابل قبول محصول خراب p
η_{pt}	قیمت فروش واحد در دوره t برای محصول p
H_{ipt}	هزینه واحد برای نگهداری محصول p در دوره t در $DC\ i$
ω_{em}	ضریب اهمیت اشتغال زایی
ω_{ed}	ضریب اهمیت توسعه منطقه ای
JO_i	تعداد شغل های ثابت ایجاد شده به ازای احداث DC در منطقه i
EV_i	میزان افزایش ارزش اقتصادی منطقه به ازای احداث DC در منطقه i
ur_i	نرخ بیکاری در منطقه i
rd_i	سطح توسعه منطقه ای در منطقه i
n	افق برنامه ریزی
dp	درصد عدم قطعیت در تقاضا
d	پارامتر کنترل عدم قطعیت تقاضا
rp	درصد عدم قطعیت برگشت محصول
r	پارامتر کنترل عدم قطعیت برگشت محصول
M	عدد بزرگ
متغیرهای تصمیم	
X_{ipkjt}	تعداد واحدهای محصول p منتقل شده با استفاده از وسیله نقلیه k از i کارخانه به مرکز توزیع (شعب) j در بازه زمانی t .
Y_i	اگر کارخانه در مکان i مستقر شود ۱ است و در غیر این صورت ۰ است
V_{ipt}	موجودی واحد محصول p در i کارخانه در دوره t
S_{ipt}	تعداد واحدهای محصول p خریداری شده در بازه زمانی t توسط DC در منطقه i
ادامه متغیرهای تصمیم	
U_{ikjt}	تعداد وسایل نقلیه نوع k برای حمل کالا از $DC\ i$ کارخانه به مرکز توزیع (شعب) j در دوره t

$$\begin{aligned}
\tau_{ijt} &= \tau_{ijt}^0 \\
&\times \left(1 + 0.15 \times \left(\frac{\phi_{ijt}}{cap_{ij}} \right)^\beta \right) \quad \forall j \in I, \forall t \in \psi, \forall i \in \Delta \quad (13)
\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
\phi_{irt} &= \phi_{irt}^0 \\
&+ \sum_{k=1}^V \omega_k \times U_{ikjt} \quad \forall j \in I, \forall t \in \psi, \forall i \in \Delta \quad (14)
\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
U_{ikjt} &= \left\lfloor \frac{\sum_{p=1}^P \omega_k \times X_{ipkjt}}{a_k} \right\rfloor \quad \forall j \in I, \forall t \in \psi, \forall k \in \Phi, \forall i \in \Delta \quad (15)
\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
&\sum_{p=1}^P \sum_{k=1}^V \sum_{r=1}^R \sum_{t=1}^T X_{ipkjt} \quad \forall i \in \Delta \quad (16) \\
&\leq M \times Y_i
\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
I_{ipt} \times S_{ipt} \times X_{ipkjt} &\geq 0, Y_i, Y_{ikrt}, q_{ipkjt} \in \{0,1\} \quad \forall j \in I, \forall p \in \Pi, \forall t \in \psi, \forall k \in \Phi, \forall i \in \Delta \quad (17)
\end{aligned}$$

تابع هدف اول (۱) کل ارزش فعلی هزینه شبکه توزیع را محاسبه می‌کند. این هزینه شامل هزینه ثابت مکان تسهیلات برای کارخانه، خرید، حمل و نقل و هزینه های نگهداری است. در عبارت (۲) مصرف سوخت و انتشار کربن وسایل نقلیه هنگام استفاده از یخچال و فریزر به حداقل می‌رسد. تابع هدف سوم (۳) به مسئولیت اجتماعی می‌پردازد. بر اساس استاندارد ISO ۲۶۰۰۰ «استاندارد بین المللی مدیریت مسئولیت اجتماعی» مشارکت و توسعه جامعه یکی از جنبه‌های اصلی SR است. دو روش اصلی برای محاسبه‌ی جنبه‌ی SR (Social Responsibility) وجود دارد.

- ایجاد اشتغال
- توسعه‌ی منطقه‌ای

در مدل پیشنهادی، پیدایش مراکز توزیع می‌تواند مشارکت و توسعه جامعه را همراه داشته باشد. همچنین افزایش اشتغال و توسعه‌ی منطقه‌ای دو عامل عمده پیدایش مراکز توزیع است. در این مدل فرصت‌های شغلی ناشی از ایجاد مراکز توزیع لحاظ می‌گردد. ارزش اجتماعی با استفاده از تعداد فرصت‌های شغلی ایجاد شده و نرخ بیکاری آن منطقه حساب می‌شود. نرخ توسعه‌ی منطقه‌ای و ارزش اقتصادی مراکز توزیع دایر شده برای ارزیابی ارزش اجتماعی لحاظ می‌گردد. از این رو معیارهای توسعه‌ی اقتصادی و اشتغال به شرح زیر است:

ϕ_{ijt}	کل ترافیک از i کارخانه به مرکز توزیع (شعب) j در بازه زمانی t
q_{ipkjt}	اگر X_{ipkjt} بیشتر از ۰ باشد ۱ است و در غیر این صورت ۰ است

۹_ مدل ریاضی مسأله

$$\begin{aligned}
\text{Min } z_{eco} &= \sum_{i=1}^D f_i \times Y_i + \sum_{i=1}^D \sum_{j=1}^J \sum_{k=1}^V \sum_{t=1}^T \frac{(b_k + c_{kt} \text{dist}_{ij}) \times U_{ikjt}}{\prod_{j=1}^t (1 + \rho_j)} \\
&- n \times \left(\sum_{p=1}^P \sum_{t=1}^T \sum_{i=1}^D \frac{\eta_{pt} \times S_{ipt}}{\prod_{j=1}^t (1 + \rho_j)} + \sum_{i=1}^D \sum_{p=1}^P \sum_{t=1}^T \frac{H_{ipt} \times V_{ipt}}{\prod_{j=1}^t (1 + \rho_j)} \right) \quad (1)
\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
\text{Min } z_{env} &= \sum_{i=1}^D \sum_{j=1}^J \sum_{k=1}^V \sum_{t=1}^T \theta \times \text{dist}_{ij} \times u_k^R \times U_{ikjt} \quad (2)
\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
\text{Max } z_{soc} &= \omega_{em} \left(n \times \sum_i (JO_i) u_{ri} Y_i \right) \\
&+ \omega_{ed} \left(\sum_i EV_i (1 - rd_i) Y_i \right) \quad (3)
\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
\text{Subject to} \\
&\sum_{k=1}^V \sum_{i=1}^D (1 - \alpha_p^R) \times X_{ipkjt} \geq \tilde{d}_{pjt} \quad \forall j \in I, \forall p \in \Pi, \forall t \in \psi \quad (4)
\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
&\sum_{k=1}^V \sum_{i=1}^D (1 - \alpha_p^R) \times X_{ipkjt} \geq R_{pjt} * \tilde{d}_{pjt} \quad \forall j \in I, \forall p \in \Pi, \forall t \in \psi \quad (5)
\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
&\tau_{ijt} \times q_{ipkjt} \leq \delta_{pt}^R \times \sqrt{\rho_{pt}^R \ln(1 - \alpha_p^R)} \quad \forall k \in \Phi, \forall i \in \Delta \quad (6)
\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
&\sum_{p=1}^P V_{ipt} + \sum_{r=1}^R \sum_{k=1}^V X_{ipkjt} \leq Y_i \times m_i \quad \forall t \in \psi, \forall i \in \Delta \quad (7)
\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
V_{ipt} &= (1 - \pi_p) \times V_{ip(t-1)} + S_{ipt} - \sum_{r=1}^R \sum_{k=1}^V X_{ipkjt} \quad \forall p \in \Pi, \forall t \in \psi, t \geq 2, \forall i \in \Delta \quad (8)
\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
V_{ip1} &= S_{ip1} - \sum_{r=1}^R \sum_{k=1}^V X_{ipk1} \quad \forall p \in \Pi, \forall i \in \Delta \quad (9)
\end{aligned}$$

$$V_{ipT} = 0 \quad \forall p \in \Pi, \forall i \in \Delta \quad (10)$$

$$q_{ipkjt} \leq M \times X_{ipkjt} \quad \forall j \in I, \forall p \in \Pi, \forall t \in \psi, \forall k \in \Phi, \forall i \in \Delta \quad (11)$$

$$q_{ipkjt} \leq \frac{X_{ipkjt}}{M} \quad \forall j \in I, \forall t \in \psi, \forall k \in \Phi, \forall i \in \Delta \quad (12)$$

$t_{ipkjt} = \tau_{ijt} \times q_{ipkjt} \leq \bar{l}_{pt}^R$ طول عمر محصول می‌باشد. اکنون، هدف تحمیل محدودیتی برای داشتن حداقل یک فرصت خاص برای یک محصول در بازه زمانی که توسط وسایل نقلیه به مقصد قبل از طول عمر محصول حمل می‌شود، است.

معادلات (۲۱) تا (۲۴) نحوه‌ی استفاده از توزیع Weibull را برای طول عمر محصول نشان می‌دهد.

$$p(t_{ipkjt} \leq \bar{l}_{pt}^R) = \int_{t_{ipkjt}}^{\infty} \frac{\beta_{pt}^R}{\delta_{pt}^R} \left(\frac{x}{\delta_{pt}^R}\right)^{\beta_{pt}^R - 1} \exp\left(-\left(\frac{x}{\delta_{pt}^R}\right)^{\beta_{pt}^R}\right) dx \quad (21)$$

$$F_{\bar{l}_{pt}^R}(t_{ipkjt}) = p(t_{ipkjt} \leq \bar{l}_{pt}^R) = 1 - \exp\left(-\left(\frac{t_{ipkjt}}{\delta_{pt}^R}\right)^{\beta_{pt}^R}\right) \leq \alpha_p^R \quad (22)$$

$$p(t_{ipkjt} \leq \bar{l}_{pt}^R) = 1 - P(t_{ipkjt} \leq \bar{l}_{pt}^R) = 1 - \left(1 - \exp\left(-\left(\frac{t_{ipkjt}}{\delta_{pt}^R}\right)^{\beta_{pt}^R}\right)\right) \geq 1 - \alpha_p^R \quad (23)$$

$$\exp\left(-\left(\frac{t_{ipkjt}}{\delta_{pt}^R}\right)^{\beta_{pt}^R}\right) \geq 1 - \alpha_p^R \quad (24)$$

معادله (۲۱) تابع چگالی احتمال طول عمر محصول که دارای توزیع Weibull با پارامترهای β_{pt}^R و δ_{pt}^R است را نشان می‌دهد. معادله (۲۲) تابع توزیع تجمعی برای متغیر تصادفی Weibull است که احتمال اینکه زمان حمل و نقل بیش‌تر از طول عمر محصول باشد، کمتر از α_p^R درصد است. در معادله (۲۳-۲۲) احتمال کم‌تر بودن زمان سفر را با استفاده از معادله (۲۲) به دست آورده و نتیجه نهایی در معادله (۲۴) نشان داده شده است.

از معادله (۲۴)، معادله (۲۴)، $t_{ipkjt} \leq \delta_{pt}^R \times \sqrt[\beta_{pt}^R]{-\ln(1 - \alpha_p^R)}$ را داریم. سمت معادله (۲۴) $\tau_{ijt} \times q_{ipkjt}$ است تا اطمینان حاصل شود که اگر X_{ipkjt} صفر باشد، محدودیت موجود در معادله (۲۴) اعمال نمی‌شود. به عبارت دیگر، با توجه به معادله (۱۰)، اگر هیچ واحد محصول p با استفاده از وسیله نقلیه k از کارخانه i به مرکز توزیع (شعب) j در بازه‌ی زمانی t منتقل نشود، q_{ipkjt} صفر است و هیچ محدودیتی از زمان صرف شده برای حمل و نقل τ_{ijt} اعمال نمی‌شود.

$$SI_{em} = \left(\sum_i (JO_i) ur_i Y_i \right) \quad (18)$$

$$SI_{ed} = \left(\sum_i EV_i(1 - rd_i) Y_i \right) \quad (19)$$

با توجه به اینکه هر دو اقدام، ماهیتی اجتماعی دارند و هم اینکه جهت جلوگیری از پیچیدگی بیشتر مدل پیشنهادی، می‌توانیم هر دو اقدام را به صورت یک تابع هدف، به کار ببریم.

$$Max Z_{SOC} = \omega_{em} \left(\sum_i (JO_i) ur_i Y_i \right) + \omega_{ed} \left(\sum_i EV_i(1 - rd_i) Y_i \right) \quad (20)$$

معادله (۴) این واقعیت را بیان می‌کند که مقدار خالص محصولات حمل شده به مرکز توزیع (شعب) باید بیشتر یا برابر با تقاضا باشد و معادله (۵) شامل این مفهوم است که مقدار ارسال محصول باید بیشتر یا برابر با مقدار برگشت محصول مربوطه باشد. مقدار خالص با کم کردن مقدار محصولات فاسد شده از کل مقدار حمل شده حساب می‌شود. معادله (۶) محدودیت زمان حمل و نقل را با توجه به مقدار محصول فاسد شده در زمان حمل و نقل، حمل می‌کند. معادله (۷) محدودیت ظرفیت مراکز توزیع را بیان می‌کند. کنترل تعادل موجودی برای مراکز توزیع برای دوره برنامه ریزی از طریق این معادله انجام می‌شود. معادله (۸) محدودیت مقادیر محصولات فاسد شده در انبار و همچنین مقادیر خریداری شده و حمل شده به مرکز توزیع (شعب) را مدنظر قرار می‌دهد. معادله‌ی مانده موجودی برای دوره اولیه از طریق معادله (۹) تعریف می‌شود. در این تحقیق فرض می‌شود که هیچ موجودی در دوره‌ی زمانی نهایی ذخیره نمی‌شود که از طریق معادله (۱۰) بیان شده است. معادله (۱۱) و (۱۲) برای تعریف متغیر کمکی q_{ipkjt} است که یک متغیر باینری است که اگر X_{ipkjt} مثبت باشد برابر با یک است و در غیر اینصورت برابر با صفر است. معادله (۱۲)، τ_{ijt} تابع عملکرد پیوندهای اداره راه‌های عمومی ایالات متحده (BPR) است. از این جهت از معادله (۱۴) استفاده می‌شود که تعداد وسایل نقلیه کوچک ترین عدد صحیح بزرگ‌تر از مقدار بدست آمده شود. معادله (۱۵) و (۱۶) ضمانت می‌دهد تنها در صورتی X_{ipkjt} مقدار می‌گیرد که مرکز توزیع ایجاد شده باشد. همچنین معادله (۱۷) نوع متغیرها را مشخص می‌کند.

رضایت‌مندی از آن تابع هدف است. در نهایت، با استفاده از مقادیر به‌دست‌آمده، راه‌حل نهایی و کارای مسأله تعیین می‌شود.

$$\mu_i^k = \begin{cases} 1 & f_i^k < f_i^{\min} \\ \frac{f_i^{\max} - f_i^k}{f_i^{\max} - f_i^{\min}} & f_i^{\min} \leq f_i^k \leq f_i^{\max} \\ 0 & f_i^k \geq f_i^{\max} \end{cases} \quad (27)$$

در رابطه‌ی (۲۸)، مقادیر بیشینه و کمینه‌ی توابع هدف به‌ترتیب با $f_i^{\max}$ و $f_i^{\min}$ برای جواب k نمایش داده می‌شوند. با در نظر گرفتن وزن اختصاص‌یافته به هر تابع هدف به صورت wt_i ، می‌توان درجه‌ی عضویت هر جواب را بر اساس رابطه‌ی (۲۹) محاسبه نمود. در این رابطه، تابع عضویت متناسب با نوع بیشینه‌سازی یا کمینه‌سازی تعریف شده و به شکل زیر محاسبه می‌گردد:

$$\mu^k = \frac{\sum_{i \in \{Min\}} wt_i \times \mu_i^k + \sum_{i \in \{Max\}} wt_i \times (1 - \mu_i^k)}{\sum_i wt_i} \quad (28)$$

بر اساس تعریف ارائه‌شده در رابطه‌ی (۲۸)، درجه‌ی عضویت تابع بیشینه‌سازی در نقطه‌ی بهینه برابر با یک و در تابع کمینه‌سازی برابر با صفر در نظر گرفته می‌شود. بنابراین، درجه‌ی عضویت در نقاط بهینه برابر با یک بوده و در سایر نقاط مقداری کمتر از یک خواهد بود. بدین ترتیب، هر چه یک جواب به نقطه‌ی بهینه نزدیک‌تر باشد، درجه‌ی عضویت آن نیز افزایش خواهد یافت و مطلوب‌تر خواهد بود. در نتیجه، با استفاده از این رویکرد مبتنی بر منطق فازی، درجه‌ی عضویت هر یک از جواب‌ها محاسبه شده و نتایج در جدول (۱) ارائه گردید.

جدول (۱). درجه‌ی عضویت هر یک نتایج برنامه ریزی آرمانی

k	μ_{eco}^k	μ_{env}^k	$1 - \mu_{soc}^k$	μ^k
۱	۰.۸	۰.۶۴۳۷۵	۰	۱
۲	۰.۸۰۰۵۶۴۵	۰.۶۴۳۷۵	۰.۹۲۰۷۴۰۵	۰.۸۴۰۷۶۰۵
۳	۰.۷۹۳۰۷۹۶	۰.۶۴۳۷۵	۰.۸۵۰۰۰۰۱	۰.۸۴۰۲۷۱۶
۴	۰.۷۹۸۳۷۰۶	۰.۶۴۳۷۵	۰.۹۰۰۰۰۰۴	۰.۸۴۰۶۱۷۹
۵	۰.۷۳۸۰۷۰۶	۰.۶۴۳۷۵	۰.۸۰۰۰۰۰۳	۰.۷۷۷۷۷۷۸

جوابی که دارای بیشترین درجه‌ی عضویت وزن‌دار باشد، به‌عنوان پاسخ مسأله انتخاب می‌شود. با توجه به اینکه جواب کارای ۲ام به یک نزدیک‌تر است، این جواب انتخاب می‌گردد.

این مدل دارای معادلات غیر خطی در تابع هدف است. برای کاهش پیچیدگی و آماده‌سازی مدل برای استفاده از روش حل، از روش‌های خطی‌سازی استفاده می‌شود. غیر خطی بودن در قسمت دوم تابع هدف در معادله (۱) به دلیل استفاده از تابع سقف است که برای محاسبه متغیر U_{ikjt} استفاده شده است. تعریف این متغیر به عنوان یک عدد صحیح و افزودن محدودیت‌های کمکی زیر می‌تواند غیرخطی بودن ناشی از تابع سقف را حل کند.

$$\frac{U_{ikjt}}{a_k} \geq \frac{\sum_{p=1}^P w_p \times X_{ipkjt}}{a_k} \quad \forall j \in I, \forall t \in \psi, \forall k \in \Phi, \forall i \in \Delta \quad (25)$$

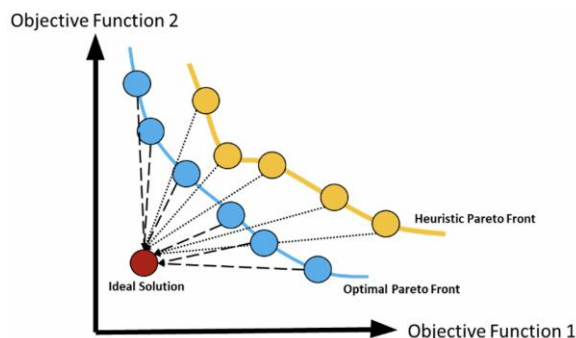
$$\frac{U_{ikjt}}{a_k} < \frac{\sum_{p=1}^P w_p \times X_{ipkjt}}{a_k} + 1 \quad \forall j \in I, \forall t \in \psi, \forall k \in \Phi, \forall i \in \Delta \quad (26)$$

۱۰- روش حل مدل

در حل مدل‌های ریاضی چندهدفه، دو روش کلاسیک و تکاملی پرکاربرد برای یافتن راه‌حل‌های بهینه وجود دارد؛ برنامه‌ریزی آرمانی (Goal Programming) و روش محدودیت اپسیلون تکامل یافته (Adaptive ϵ -Constraint). برنامه‌ریزی آرمانی، هر هدف به صورت یک مقدار مطلوب (آرمانی) تعریف شده و مسئله به گونه‌ای مدل‌سازی می‌شود که انحرافات از این مقادیر حداقل شود، به طوری که امکان تعادل بین اهداف مختلف فراهم گردد. روش محدودیت اپسیلون تکامل یافته، با انتخاب یک هدف به عنوان تابع هدف اصلی و تبدیل سایر اهداف به محدودیت‌هایی با حداقل یا حداکثر مجاز (epsilon)، امکان بررسی نقاط بهینه مرزی (Pareto) را فراهم می‌آورد. این دو روش، ابزارهای مؤثری برای مدیریت اهداف متعارض و تحلیل تصمیم‌گیری چندمعیاره در مسائل عملی ارائه می‌کنند.

۱۱- جواب مطلوب برنامه ریزی آرمانی

به منظور انتخاب مناسب‌ترین راه‌حل از میان مجموعه پاسخ‌های کارا، روش‌های متعددی در ادبیات پژوهش ارائه شده است. در این مطالعه از رویکرد مبتنی بر منطق فازی بهره گرفته شده است. بدین ترتیب، برای هر یک از توابع هدف، یک تابع عضویت خطی تعریف گردیده که مقدار آن بر اساس روابط مشخص محاسبه می‌شود و بیانگر میزان تحقق و



نگاره (۲). صورت شماتیک مفهوم شاخص MID
این شاخص برای دو روش محاسبه شده است که در جدول (۳) آورده شده است.

جدول (۳). مقادیر شاخص MID

روش‌های حل	روش محدودیت افسیلون اصلاح شده	روش برنامه‌ریزی آرمانی
MID	0.681520396	۰.۷۳۸۴۳۴۴۸۴

با توجه به ماهیت شاخص MID یعنی فاصله از نقاط ایده‌آل، هر چه این مقدار کمتر باشد یعنی روش به صورت مطلوب‌تری عمل کرده است. بنابراین، در حل مدل این پژوهش روش محدودیت افسیلون تکامل یافته که عدد پایین‌تری را در این شاخص کسب کرده است و مبنای تحلیل‌های آتی قرار می‌گیرد.

۱۴- تحلیل نتایج

در حل تک‌هدفه آشکار شد که تابع هدف اقتصادی با دو تابع هدف دیگر یعنی توابع هدف زیست‌محیطی و اجتماعی در تعارض جدی قرار دارد؛ به‌گونه‌ای که بهینه‌سازی هر یک از آن‌ها مستلزم قربانی کردن دیگری است. این امر به‌خوبی ضرورت بهره‌گیری از رویکردهای چندهدفه را نشان می‌دهد، زیرا اتکا به یک تابع هدف منفرد نمی‌تواند تصویری جامع و واقع‌بینانه از رفتار سیستم ارائه کند.

نتیجه شاخص MID حاکی از برتری نتایج روش محدودیت افسیلون تکامل یافته می‌باشد.

از لحاظ منطقی نیز این جواب قابل تحلیل است. مقدار تابع هدف اقتصادی در جواب بهینه که مقدار ۴۷۱,۲۱۹,۵۰۰ میلیون ریال را نشان می‌دهد که با مقدار بهینه خود یعنی ۴۶۵,۷۴۸,۰۳۶ میلیون ریال به میزان ۵,۴۷۱,۴۶۴ میلیون ریال فاصله دارد. از طرفی سطح پایین و منطقی تابع هدف

۱۲- جواب مطلوب محدودیت افسیلون اصلاح شده

برای انتخاب بهترین جواب از بین جواب‌های حاصل شده می‌توان از روش‌های زیادی استفاده کرد. در اینجا از روش مبتنی بر منطق فازی استفاده می‌شود. با استفاده از این روش درجه عضویت هر یک از جواب‌ها محاسبه شده و در جدول (۲) قرار گرفته است.

جدول (۲). جواب محدودیت افسیلون تکامل یافته از بین جواب‌های کارا

k	μ_{eco}^k	μ_{env}^k	$1 - \mu_{soc}^k$	μ^k
۱	۰.۰۲۵۴۱۷	۰	۰	۰.۶
۲	۰.۰۰۰۰۰۰۲۷۳	۰.۶۱۵۰۵۱۹	۱	۰.۳۲۳۰۷
۳	۰.۰۰۰۰۰۰۲۴۹	۰.۹۸۲۶۹۹	۱	۰.۳۹۶۶
۴	۱	۰.۲۵۴۳۲۵	۰	۰.۶۵۰۸۶
۵	۰.۰۰۰۰۰۰۴۳۳	۰.۸۶۲۴۵۶۷	۱	۰.۳۷۲۵۹

با توجه به اینکه تابع وزن دار در جواب کارای ۷ ام به یک نزدیک‌تر است، به عنوان جواب مسئله از این روش انتخاب می‌گردد.

۱۳- مقایسه تحلیل روش‌های پیشنهادی

به منظور انتخاب نهایی روش‌های حل پیشنهادی و انتخاب بهترین جواب هر روش در این بخش از شاخص MID کمک گرفته شده است. این شاخص از طریق محاسبه فاصله اقلیدسی جواب ایده‌آل با هر یک از حل‌های بدست آمده از دو روش محدودیت افسیلون اصلاح شده و برنامه‌ریزی آرمانی و محاسبه میانگین آن برای هر روش می‌تواند سنجش مناسبی از عملکرد هر روش ارائه دهد. این شاخص با فرمول (۲۹) محاسبه می‌شود.

$$MID = \sum_{i=1}^{|Q|} \sqrt{\sum_{j=1}^{n_{obj}} \left(\frac{f_i^j - f_{best}^j}{f_{max}^j - f_{min}^j} \right)^2} / |Q| \quad (29)$$

f_i^j مربوط به i امین حل j امین تابع هدف است. همچنین f_{best}^j مقدار ایده‌آل تابع هدف j ام f_{min}^j و f_{max}^j به ترتیب بیشترین و کمترین مقدار تابع هدف j ام است. مقدار $|Q|$ معرف تعداد نقاط موجود در ناحیه بهینه و n_{obj} تعداد توابع است. صورت شماتیک مفهوم شاخص MID در نگاره (۲) قابل مشاهده است.

دوم با مقدار ۱۷۶,۷۳۵ انتشار آلاینده و افزایش قابل توجه در تابع هدف سوم تا سطح ۱۱,۴۰۰,۰۰۰ میلیون ریال نشان از برتری این جواب دارد. در این جواب بهینه مقدار تابع هدف دوم بیش از دو برابر افزایش هزینه می‌باشد که عملاً دو برابر هزینه انجام شده در قبال مسئولیت اجتماعی ایجاد ارزش شده است.

۱۵- جمع‌بندی

مدل توسعه‌یافته توانایی مدیریت همزمان اهداف متعارض اقتصادی، زیست‌محیطی و اجتماعی را در چارچوب یک نظام تصمیم‌گیری چندهدفه داراست. حل تک‌هدفه آشکار ساخت که این سه هدف در تضاد بنیادین با یکدیگر قرار دارند و تمرکز بر یک هدف منفرد نمی‌تواند بازتاب‌دهنده رفتار واقعی سیستم باشد. مقایسه‌ی دو رویکرد مورد استفاده نشان داد که برنامه‌ریزی آرمانی علی‌رغم ارائه‌ی پاسخی متوازن و قابل تفسیر، به شدت به وزن‌های تخصیص‌یافته حساس بوده و صرفاً یک جواب منفرد تولید می‌کند؛ بنابراین، کارآمدی آن در شرایط پیچیده و پرتعامل محدود است. در مقابل، روش محدودیت اپسیلون با امکان ترسیم جبهه‌ی پارتو، تبیین صریح مبادله‌ها میان اهداف و شناسایی نقاط زانو به‌عنوان راه‌حل‌های برتر، ظرفیت علمی و کاربردی بالاتری را از خود نشان داد. تحلیل نتایج این روش، گویای دستیابی به راه‌حلی است که توازن منطقی میان کاهش هزینه‌ها، بهبود عملکرد زیست‌محیطی و ارتقای شاخص اجتماعی برقرار می‌سازد. همچنین بررسی متغیرهای تصمیم در این نقطه، انتخاب کارخانه مشهد و بهره‌گیری از ناوگان سنگین ايسوزوی ۱۰ تن را به‌عنوان راهبردی بهینه در شبکه توزیع معرفی کرد؛ راهبردی که از منظر سه‌گانه‌ی پایداری توجیه‌پذیر است. بدین ترتیب، می‌توان نتیجه گرفت که روش محدودیت اپسیلون تکامل یافته در این مطالعه نسبت به برنامه‌ریزی آرمانی برتری آکادمیک و عملی معناداری داشته و به‌عنوان ابزاری معتبر و اثربخش برای پشتیبانی تصمیم‌گیری در شرایط تعارض اهداف و عدم قطعیت قابل توصیه است.

منابع

پیرتاج سعید و موسی زاده محمد. (۲۰۲۲). طراحی شبکه توزیع تاب آور در زنجیره تأمین پایدار غلات: یک رویکرد برنامه ریزی امکانی-استوار.

مشهدی ندا و توکلی مقدم رضا. (۲۰۲۱). مدل سازی ریاضی برای مسئله مکان یابی-مسیریابی دو سطحی در زنجیره تامین مواد غذایی فسادپذیر با ریسک اختلال.

Musavi, M., & Bozorgi-Amiri, A. (2017). A multi-objective sustainable hub location-scheduling problem for perishable food supply chain. *Computers & Industrial Engineering*, 113, 766-778.

Kovacic, D., Hontoria, E., Ros-McDonnell, L., & Bogataj, M. (2015). Location and lead-time perturbations in multi-level assembly systems of perishable goods in Spanish baby food logistics. *Central European journal of operations research*, 23(3), 607.

Soytas, U., Sari, R., & Ewing, B. T. (2007). Energy consumption, income, and carbon emissions in the United States. *Ecological economics*, 62(3-4), 482-489.

Haji, M., Kerbache, L., Muhammad, M., & Al-Ansari, T. (2020). Roles of technology in improving perishable food supply chains. *Logistics*, 4(4), 33.

Jouzdani, J., & 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, 123060.

Zhu, Q., & Krikke, H. (2020). Managing a sustainable and resilient perishable food supply chain (PFSC) after an outbreak. *Sustainability*, 12(12), 5004.



Perishable food distribution network design under the uncertainty of demand, lifetime and product returns

Elahe Jafarnezhad ^{1*}, Seyed Kamal Chaharsooghi ¹

1. Faculty of Industrial and Systems Engineering, Tarbiat Modares University, Tehran, Iran.

Article information

Keywords:

Distribution network design,
Supply chain, Uncertainty,
Perishable food products,
Goal programming,
Augmented ϵ -constraint



Elahe Jafarnezhad (Corresponding author)
Email: e.jafarnezhad@modares.ac.ir

Abstract

Designing distribution networks for perishable food products is a critical challenge in supply chain management due to product perishability, demand uncertainty, and product returns. This study develops a multi-objective mixed-integer linear programming model for designing a perishable food distribution network by simultaneously considering economic, environmental, and social objectives. The proposed model aims to minimize total economic costs, fuel consumption, and carbon emissions while maximizing employment opportunities and regional development. To address uncertainty, demand uncertainty and product return rates are incorporated into the model, and product lifetime is characterized using the Weibull distribution. The proposed multi-period MILP model is solved using Goal Programming (GP) and the Augmented ϵ -Constraint (AUGMECON) method. The performance of the solution approaches is evaluated based on the Mean Ideal Distance (MID) metric. The applicability of the proposed model is demonstrated through a real-world case study in Namino Food Industries. Computational results indicate that AUGMECON outperforms GP by generating more efficient and well-balanced Pareto-optimal solutions. Furthermore, sensitivity analysis reveals that increasing demand and product return rates leads to higher total costs and greater environmental impacts, whereas the social objective is affected only when establishing a new production facility becomes necessary. The results also show that the proposed model improves network performance through optimal facility location, efficient product flow allocation, and appropriate vehicle selection, leading to lower operational costs, reduced carbon emissions, improved service levels, and enhanced social performance. Therefore, the proposed model provides an effective decision-support tool for the strategic design and optimization of perishable food distribution networks.