



## ارائه مدل چندهدفه فازی طراحی زنجیره تأمین سبز دوکاناله با در نظر گرفتن قیمت‌گذاری تحت شرایط عدم قطعیت

مریم رضاخانلو<sup>۱</sup>، حسین عموزاد خلیلی<sup>۲\*</sup>، سیدمحمدجواد میرزاپور آل هاشم<sup>۳</sup>

۱. کارشناس ارشد مهندسی صنایع، دانشکده مهندسی صنایع و سیستم‌های مدیریت، دانشگاه صنعتی امیرکبیر (پلی‌تکنیک تهران)، ایران

۲. استادیار، گروه مهندسی صنایع، واحد نوشهر، دانشگاه آزاد اسلامی، نوشهر، ایران

۳. استادیار، دانشکده مهندسی صنایع و سیستم‌های مدیریت، دانشگاه صنعتی امیرکبیر (پلی‌تکنیک تهران)، ایران

### خلاصه

به دنبال روند جهانی اخیر در به کارگیری استراتژی‌های کاهش انتشار گازهای گل‌خانه‌ای (GHG) و با توجه به تکامل مدل‌های تجاری از سنتی به چندکاناله، و نیز روندهای فزاینده جهانی به سمت سیستم‌های فروش آنلاین، در این پژوهش به بررسی یک زنجیره تأمین سبز دوکاناله پرداخته‌ایم. در این شبکه تولیدکننده محصول خود را از طریق یک کانال مستقیم (آنلاین) و یک کانال خرده‌فروشی (سنتی) که تقاضای آن‌ها غیرقطعی است، توزیع می‌کند. قیمت‌ها در کانال‌های توزیع می‌تواند بر تقاضای مشتریان تأثیر بگذارد. مدل‌سازی این زنجیره با محاسبه قیمت بهینه کانال‌های توزیع، بهینه‌سازی سود کل و کاهش هزینه‌های حمل‌ونقل، انتشار گاز کربن دی‌اکسید را به حداقل می‌رساند. انتشار گاز CO<sub>2</sub> وابسته به وجه حمل‌ونقل در نظر گرفته شده است. مدل پیشنهادی ابتدا به صورت یک مدل برنامه‌ریزی عدد صحیح مختلط غیرخطی توسعه یافته است، سپس از یک تکنیک نظری برای خطی‌سازی مدل استفاده شده است. به منظور حل مدل چندهدفه ارائه شده، از روش TH و Jimenez استفاده شده است. اعتبارسنجی مدل با آزمایش عددی انجام شده و سپس چندین تحلیل حساسیت بر روی پارامترها انجام گرفته است. نتایج محاسباتی و تحلیل حساسیت بر روی پارامترهای مسأله کارآمدی مدل را در برقراری تعادل بین اهداف اقتصادی و زیست‌محیطی نشان داد به طوری که در صورت برابر بودن هزینه‌های حمل‌ونقل برای ارسال کالا به هر دو بازار، جهت برقراری تعادل بین اهداف، از وسایلی که آلاینده‌گی زیست‌محیطی کمتری دارند، بیشتر استفاده می‌شود. علاوه بر این روش حل پیشنهادی تصمیم‌گیر را قادر می‌سازد میزان اهمیت هر یک از توابع هدف را مشخص کند. همچنین تصمیم‌گیر می‌تواند با تغییر ضرایب موجود در رابطه قیمت تقاضا، بر روی قیمت بهینه کانال‌های توزیع تأثیرگذار باشد و با تعیین قیمت بهینه سود کل زنجیره تأمین را افزایش دهد.

### اطلاعات مقاله

تاریخچه مقاله:

دریافت ۱۴۰۰/۲/۵

پذیرش ۱۴۰۰/۴/۲۶

(مقاله پژوهشی)

کلمات کلیدی:

زنجیره تأمین سبز  
قیمت‌گذاری زنجیره تأمین  
دوکاناله  
برنامه‌ریزی امکانی  
بهینه‌سازی چندهدفه فازی  
تعاملی

### ۱. مقدمه

در تحقیق حاضر، یک شبکه زنجیره تأمین سبز دوکاناله در عدم قطعیت برخی پارامترهای مسأله طراحی می‌گردد که حوزه جدیدی را از طریق ترکیب مفاهیم زنجیره تأمین سبز و شبکه‌های دوکاناله، در طراحی

شبکه زنجیره تأمین توسعه داده است. شبکه زنجیره تأمین، سبز، تک‌محصولی و دوسطحی شامل کارخانجات و مراکز توزیع در نظر گرفته شده است. در این پژوهش مفهوم زنجیره تأمین سبز از طریق انتخاب حالت حمل‌ونقل بین تسهیلات در هر کانال که ارتباط مستقیم با میزان

\* نویسنده مسئول: حسین عموزادخلیلی

تلفن: ۰۲۱-۶۴۵۴۵۳۵۰ پست الکترونیکی: Amoozad92@yahoo.com

آب‌وهوایی و مقررات دولتی، کاهش انتشار گازهای گلخانه‌ای به‌ویژه گاز کربن دی‌اکسید (CO<sub>2</sub>)، به‌عنوان بیشترین گاز گلخانه‌ای ناشی از فعالیت‌های انسانی، بسیار جدی تلقی می‌گردد. منابع اولیه انتشار گازهای گلخانه‌ای ناشی از فعالیت‌های انسانی در بخش‌های مختلف اقتصادی مانند برق، حمل‌ونقل، صنعت، تجاری و مسکونی و کشاورزی است. براساس گزارش آژانس حفاظت از محیط زیست ایالات متحده (EPA)<sup>۱</sup> در سال ۲۰۲۱، انتشار گازهای گلخانه‌ای ناشی از حمل‌ونقل جاده‌ای و غیرجاده‌ای<sup>۲</sup> حدود ۲۹ درصد از کل انتشار گازهای گلخانه‌ای ایالات متحده را تشکیل می‌دهد، که میزان رشد آن در سال‌های ۲۰۱۹-۱۹۹۰ بیش از سایر بخش‌هاست [۱]. انتشارات ناشی از حمل‌ونقل عمدتاً از سوختن سوخت‌های فسیلی برای ماشین‌ها، کامیون‌ها، کشتی‌ها، قطارها و هواپیماها ایجاد می‌گردد. بسیاری از کشورها قوانین و محدودیت‌هایی نظیر طرح مالیات بر کربن برای کاهش انتشارات کربن از تولید تا حمل‌ونقل اعمال کرده‌اند. بنابراین کاهش انتشار کربن در فعالیت‌های لجستیکی و افزایش بهره‌وری در مصرف انرژی امری ضروری است [۲].

از سوی دیگر با پیشرفت سریع فناوری اطلاعات رفتار خرید مصرف‌کنندگان نیز به خرید مستقیم محصولات از کارخانه در کنار خرید غیرمستقیم از مراکز توزیع تغییر پیدا کرده است [۳]. متقابلاً توجه تولیدکنندگان نیز به کانال‌های توزیع مستقیم بیشتر شده است به‌طوری‌که ۶۸ درصد تولیدکنندگان کالاهای مصرفی کانال فروش آنلاین نیز ایجاد کرده‌اند [۴]. بنابراین نیاز به بازطراحی ساختارهای توزیع زنجیره تأمین به‌وضوح دیده می‌شود. می‌توان گفت یکی از مهم‌ترین مسائل در طراحی شبکه‌های زنجیره تأمین دوکاناله تعیین قیمت رقابتی بین دو کانال توزیع است [۵]. بنابراین رقابت برای جذب مصرف‌کنندگان با تعیین یک قیمت بهینه و تحویل سریع کالا و خدمات و ارتباط مستقیم با آن‌ها قابل توجه است. پیشوائی و رزمی [۶] یک مدل برنامه‌ریزی ریاضی چندهدفه فازی برای طراحی زنجیره تأمین زیست‌محیطی در شرایط عدم قطعیت ارائه کرده است. مدل پیشنهادی به حداقل‌سازی تأثیرات زیست‌محیطی در کنار هزینه‌های معمول تولید و با در نظر گرفتن محدودیت‌های ظرفیت می‌پردازد. در این مدل از روشی برمبنای ارزیابی چرخه عمر محصول، برای تشخیص و تعیین تأثیرات زیست‌محیطی استفاده می‌شود. در مقاله رمضانی و همکاران [۷] یک مدل چندهدفه تصادفی، چند-سطحی و چند-دوره‌ای برای شبکه لجستیک یکپارچه تحت شرایط عدم قطعیت محیطی با اهداف حداکثرسازی سود، حداقل‌سازی زمان پاسخ‌گویی به مشتری و حداکثرسازی کیفیت ارائه می‌گردد. در مدل ارائه شده، هزینه جمع‌آوری، بازیافت، قیمت محصولات، نرخ تقاضا و نرخ بازگشت به‌صورت غیرقطعی فرض شده است. بشیری و شرافتی [۸] با طراحی یک مدل چندمحصولی به طراحی یک زنجیره تأمین حلقه بسته می‌پردازد که مسأله طراحی شبکه و انتخاب بهترین تأمین‌کننده را

گازهای گلخانه‌ای انتشار یافته دارد، ارائه شده است. این درحالی است که هر حالت دارای مشخصات متفاوتی در هزینه، زمان و تأثیرات زیست‌محیطی می‌باشد. علاوه بر آن در این تحقیق دیگر جنبه‌های طراحی شبکه زنجیره تأمین از قبیل تولید، قیمت‌گذاری، فروش از دست‌رفته و هزینه‌های مرتبط با آن، محدودیت‌های ظرفیت و زمان تحویل مورد توجه قرار گرفته‌اند. ویژگی مهم این زنجیره تأمین در نظر گرفتن دو کانال فروش برای توزیع محصول می‌باشد. در کانال اول محصول به‌صورت مستقیم از تولیدکننده به‌دست مصرف‌کننده می‌رسد و کانال دوم محصول را با عبور از یک واسطه به‌دست مشتری نهایی می‌رساند. در شبکه‌های توزیع دوکاناله، قیمت کانال‌های توزیع روی تقاضای مشتریان اثر می‌گذارد. تفاوت بین قیمت‌ها در دو کانال می‌تواند موجب جابه‌جایی تقاضای مشتریان بین دو کانال توزیع گردد. بنابراین تقاضا برای هر کانال یک متغیر وابسته به قیمت هر دو کانال است. همچنین وسایل حمل‌ونقل مختلفی برای ارسال محصول به هر بازار در نظر گرفته شده‌اند که هر یک دارای مشخصات متفاوتی در هزینه حمل‌ونقل، زمان تحویل و میزان انتشار گاز کربن دی‌اکسید (CO<sub>2</sub>) می‌باشد. از سوی دیگر تفاوت بودن هزینه‌های ثابت و متغیر حمل‌ونقل در هر یک از وسایل استفاده شده بر هزینه کل حمل محصولات به هر بازار تأثیرگذار است.

در نهایت مدل به‌دست آمده یک برنامه‌ریزی عدد صحیح مختلط با دو تابع هدف است که هدف اول مدل پیشنهادی سود کل زنجیره تأمین طراحی شده و هدف دوم آن کمینه‌سازی انتشار گاز گلخانه‌ای می‌باشد. با توجه به NP-hard بودن مدل ریاضی برای حل آن از یک رویکرد دومرحله‌ای استفاده شده است. در مرحله اول مدل اصلی به یک مدل قطعی کمکی معادل تبدیل شده است و سپس در مرحله دوم از یک رویکرد برنامه‌ریزی چندهدفه فازی تعاملی جهت تک‌هدفه ساختن مدل و به‌دست آوردن مجموعه جواب بهینه پارتو استفاده شده است. با استفاده از این رویکرد، یک مدل تک‌هدفه قطعی معادل به‌دست آمده و بطور دقیق با نرم‌افزار IBM ILOG CPLEX حل شده است. با توجه به چالش‌های ذکر شده، ضرورت وارد شدن مسائل طراحی شبکه زنجیره تأمین سبز به ساختار بازارهای امروزی و بررسی ملاحظات زیست‌محیطی و اقتصادی در آن، انگیزه انجام این تحقیق را ایجاد کرده است. این پژوهش سعی دارد با ارائه یک مدل چندهدفه که در آن علاوه بر حداکثرسازی سود، شرایط سبز همانند میزان انتشار گازهای گلخانه‌ای نیز به‌عنوان توابع هدف در نظر گرفته می‌شود، به ایجاد تعادل بین مسائل محیط زیستی و اقتصادی بپردازد.

## ۲. پیشینه‌ی تحقیق

در سال‌های اخیر، رشد سریع اقتصاد و فعالیت‌های انسانی منجر به افزایش غلظت گازهای گلخانه‌ای (GHG) در جو زمین و گرم شدن آن شده است. با توجه به افزایش آگاهی از اثرات زیان‌بار تغییرات

گرفته‌اند که محصول از طریق کانال سنتی توزیع و کالای بازتولید شده از طریق کانال آنلاین فروخته می‌شود. تأثیر دو فاکتور علاقه مشتری برای خرید کالای بازتولید شده و ترجیح مشتری برای خرید از طریق فروش مستقیم ارزیابی شده است. جمالی و راستی برزکی [۱۸] یک رویکرد تئوری بازی برای قیمت‌گذاری تولیدات سبز و غیرسبز در یک زنجیره تأمین رقابتی پایدار و دوکاناله ارائه کرده‌اند. این مقاله بر قیمت‌گذاری دو کالای جانشین تولیدشده توسط دو تولیدکننده مختلف در یک زنجیره تأمین دوکاناله و تعیین درجه سبز بودن محصول در رقابت با تولیدات غیرسبز می‌پردازد. مداک و کل [۱۹] مسأله قیمت‌گذاری را در یک زنجیره تأمین دوکاناله بررسی کرده است. در این مطالعه، تقاضای احتمالی وابسته به قیمت‌های فروش (آنلاین و خرده‌فروشی) و زمان تحویل آنلاین است. ژانگ و همکاران [۲۰] یک مدل چندهدفه برای برقراری تعادل بین هزینه کل و عملکرد زیست‌محیطی در یک زنجیره تأمین سبز دوکاناله ارائه کرده است. همچنین حالت حمل‌ونقل را به‌عنوان متغیر تصمیم در نظر گرفته و نشان داده است که در صورت امکان انتخاب حالت حمل‌ونقل، تعادل بهتری بین اهداف حاصل می‌شود. وفایی و همکاران [۲۱] یک مدل برنامه‌ریزی خطی عدد صحیح مختلط برای یک شبکه توزیع پایدار چندکاناله، چندمحصولی و چندسطحی توسعه داده است، که حالت‌های چندگانه حمل‌ونقل را در نظر گرفته است. توابع هدف مدل پیشنهادی، هزینه حمل‌ونقل و انتشار کربن حاصل از حمل‌ونقل را حداقل و فرصت‌های شغلی را حداکثر می‌کنند. در مقاله برزین پور و تاکی [۴] که به‌عنوان مقاله پایه این پژوهش مورد استفاده قرار گرفته است، یک مدل ریاضی تک‌هدفه با در نظر گرفتن قیمت‌گذاری و حالت‌های مختلف حمل‌ونقل در طراحی شبکه زنجیره تأمین سبز دوکاناله توسعه داده‌اند. در زنجیره تأمین مفروض انتخاب حالت حمل‌ونقل به‌عنوان تصمیمی که بر هزینه حمل‌ونقل و میزان انتشار گازهای گلخانه‌ای اثر دارد، در نظر گرفته شده است. همچنین تابع هدف مسأله سود کل زنجیره تأمین را حداکثر می‌کند.

در پژوهش حاضر، مدل ارائه شده توسط برزین پور و تاکی [۴] به‌صورت یک مدل چندهدفه با حداکثرسازی سود و حداقل‌سازی انتشار گازهای گلخانه‌ای توسعه داده شده است. همچنین، طراحی مسأله با در نظر گرفتن عدم قطعیت فازی برای برخی پارامترهای مسأله انجام شده است.

## ۲-۱. شکاف تحقیقاتی

باتوجه به مرور ادبیات انجام شده، ملاحظه می‌شود که تعداد محدودی از مقالات طراحی زنجیره تأمین مسائل زیست‌محیطی، دو کانال فروش آنلاین و سنتی، و تصمیمات قیمت‌گذاری را به‌صورت هم‌زمان در مدل‌سازی خود در نظر گرفته‌اند. به‌گونه‌ای که هر کدام از این مقالات با در نظر گرفتن برخی فرضیات محدودکننده به طراحی یک مدل زنجیره تأمین پرداخته‌اند. بنابراین، نوآوری‌های تحقیق حاضر نسبت به پژوهش‌های انجام شده به‌صورت زیر خلاصه می‌شود:

- توسعه ساختار چندهدفه برای در نظر گرفتن ابعاد اقتصادی و

توامان در نظر می‌گیرد. مدل ارائه شده به صورت دوهدفه و در محیط فازی طراحی شده است. در مطالعه دیگری که توسط قهرمانی نهر و همکاران [۹] انجام شده، یک شبکه زنجیره تأمین حلقه بسته، چنددوره‌ای، چندمحصولی با اهداف زیست‌محیطی و اقتصادی و با در نظر گرفتن عدم قطعیت پارامترها طراحی شده است. همچنین، مفاهیم کمبود قابل جبران و تخفیف در طراحی مدل در نظر گرفته شده است. میرزاپور آل هاشم و همکاران [۱۰] یک مدل برنامه‌ریزی عدد صحیح مختلط غیرخطی برای حل مسأله برنامه‌ریزی تولید تجمیعی چندمحصولی و چنددوره‌ای در زنجیره تأمین سبز و با فرض تقاضای غیر قطعی ارائه داده است. در مدل پیشنهادی که به حداقل‌سازی هزینه کل می‌پردازد به ارتباط بین زمان تحویل و هزینه حمل‌ونقل و همچنین سطح انتشار گازهای گلخانه‌ای توجه شده است. سازور و همکاران [۱۱] یک مدل ریاضی تصادفی و یک سیاست بازسازی در زنجیره تأمین دوسطحی متمرکز برای محصولات فسادپذیر ارائه داده‌اند. در مدل پیشنهادی به هزینه‌های مربوط به چندین حالت حمل‌ونقل، موجودی و همچنین تأثیرات زیست‌محیطی و تقاضای غیرقطعی توجه شده است. تسائو و همکاران [۱۲] یک مسأله طراحی شبکه زنجیره تأمین سبز با در نظر گرفتن برنامه تجارت کربن برای عرضه‌کننده‌ها ارائه کرده است. هدف مسأله حداکثر کردن سود کل زنجیره تأمین در بازار فیزیکی و بازار کربن است. مدل طراحی شده، لوکیشن و ظرفیت تسهیلات، جریان بهینه محصولات بین تسهیلات و قیمت بهینه فروش کالا را تعیین می‌کند. ونگ و وان [۱۳] یک مدل ریاضی عدد صحیح مختلط چندهدفه با اهداف حداکثرسازی سود و حداقل‌سازی انتشار کربن به‌صورت هم‌زمان ارائه کرده‌اند. در مدل پیشنهادی ایشان تقاضای مشتریان متأثر از قیمت و سطح سبز بودن کالا است و همچنین عدم قطعیت در فرایند تولید در نظر گرفته شده است. روی و همکاران [۱۴] یک مدل ریاضی برای زنجیره تأمین دوکاناله و دوسطحی شامل یک تولیدکننده و یک توزیع‌کننده فرمول-بندی کرده است که در آن تولیدکننده از یک کانال آنلاین مستقیم و یک کانال خرده‌فروشی سنتی برای فروش تولیدات خود استفاده می‌کند. از تحلیل بازی استکلبرگ برای سطح بهینه موجودی، قیمت فروش و سطح خدمات برای هر دو کانال فروش استفاده شده است. ژو و همکاران [۱۵] مدلی را به‌منظور ارزیابی اثر قیمت و زمان تحویل بر ساختار و موقعیت کانال‌ها ارائه داده است. آن‌ها با تحلیل تئوری بازی‌ها نشان داده‌اند که انتخاب ساختار کانال‌ها به پذیرش مشتریان کانال آنلاین و پارامتر قیمت بستگی دارد. همچنین تصمیمات زمان تحویل کالا در ساختارهای مختلف کانال‌ها بررسی شده است. دینگ و همکاران [۱۶] یک سیستم قیمت‌گذاری سلسله‌مراتبی را در یک کانال توزیع دوگانه تحت بازی استکلبرگ مطالعه می‌کند و قیمت بهینه برای عمده‌فروش، خرده‌فروش و قیمت فروش کانال مستقیم را پیدا می‌کند. گان و همکاران [۱۷] یک مدل ریاضی برای تعیین فاکتورهای قیمت‌گذاری در یک سیستم دوکاناله برای محصولات با چرخه عمر کوتاه ارائه کرده است. آن‌ها یک زنجیره تأمین حلقه بسته را در نظر

از محیط غیرقطعی می باشد.

۳-۱. فرضیات مدل

- برخی فرضیات مدل به شرح زیر است:
- مکان های مشتریان اولیه، کارخانه ها و مراکز توزیع معلوم و ثابت هستند.
- فرض شده است که هر تولیدکننده می تواند کلای تولیدی خود را به هر دو مشتری مستقیم و غیرمستقیم ارسال کند.
- محدودیت زمان تحویل برای ارسال کالاها به بازارها برای هر دو کانال وجود دارد.
- کارخانه ها و مراکز توزیع دارای محدودیت ظرفیت برای ارسال کالا می باشند.
- کمبود مجاز بوده و به صورت سفارش ازدست رفته است.
- فرض می شود که کل محصول تولیدی در طول دوره توسط کارخانه به بازار مستقیم و مراکز توزیع ارسال می شود.
- تکنولوژی تولید متفاوت منجر به تفاوت هزینه تولید و مقدار گاز گلخانه ای منتشر شده در کارخانه ها می شود.
- هر وسیله حمل دارای یک هزینه ثابت برای ارسال و هزینه متغیر به ازای هر واحد کالای ارسالی می باشد.

۳-۲. نمادگذاری

شاخص ها:

- $i = 1, \dots, L$  شاخص مکان های کاندید برای کارخانه ها
- $j = 1, \dots, J$  شاخص مکان های کاندید برای توزیع کنندگان
- $k_1 = 1, \dots, K_1$  شاخص مکان های مشخص برای مشتریان آنلاین
- $k_2 = 1, \dots, K_2$  شاخص مکان های مشخص برای مشتریان سنتی
- $l = 1, \dots, L$  شاخص نوع وسیله حمل و نقل

پارامترها:

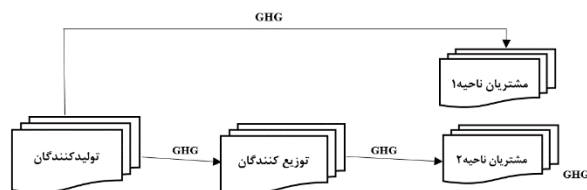
- $\overline{DS}_1$  اندازه غیرقطعی تقاضای پایه محصول در بازار  $k_1$
- $\overline{DS}_2$  اندازه غیرقطعی تقاضای پایه محصول در بازار  $k_2$
- $FP_i$  هزینه ثابت احداث و راه اندازی کارخانه  $i$
- $FD_j$  هزینه ثابت احداث و راه اندازی مرکز توزیع  $j$
- $TF_l$  هزینه ثابت ارسال کالا توسط وسیله حمل و نقل  $l$
- $TV_l$  هزینه متغیر ارسال کالا توسط وسیله حمل و نقل  $l$  به ازای واحد مسافت
- $VL_l$  ظرفیت حمل محصول برای یک وسیله حمل و نقل  $l$
- $PC_i$  هزینه ساخت واحد کالا در کارخانه  $i$
- $CPP_i$  بیشینه ظرفیت کارخانه  $i$
- $CPD_j$  بیشینه ظرفیت توزیع کننده  $j$
- $PI_{k_1}$  هزینه جریمه برای هر واحد فروش ازدست رفته در کانال آنلاین
- $PD_{k_2}$  هزینه جریمه برای هر واحد فروش ازدست رفته در کانال سنتی
- $\overline{LT}_{jk_2l}$  زمان تحویل غیرقطعی از توزیع کننده  $j$  به بازار غیرمستقیم  $k_2$  از طریق وسیله حمل و نقل  $l$

زیست محیطی

- توسعه یک مدل بهینه سازی چندهدفه فازی برای طراحی یک زنجیره تأمین سبز دوکاناله در عدم قطعیت پارامترها
- تبدیل مدل غیرخطی به خطی معادل با استفاده از تکنیک های دقیق
- در نظر گرفتن محدودیت ظرفیت ارسال باتوجه به تعداد وسایل حمل و نقل در دسترس و همچنین به دست آوردن تعداد مناسب وسایل حمل و نقل در هر مسیر
- استفاده از یک رویکرد دو مرحله ای برای حل مدل چندهدفه فازی ارائه شده

۳. مدل ریاضی و روش حل

این مقاله به ارائه یک مدل ریاضی برای طراحی شبکه زنجیره تأمین دوکاناله با در نظر گرفتن اثرات زیست محیطی و در شرایط عدم قطعیت پارامترها می پردازد. مدل ارائه شده یک برنامه ریزی عدد صحیح مختلط با دو تابع هدف برای بیشینه سازی سود و کمینه سازی انتشار گاز گلخانه ای می باشد. زنجیره تأمین طراحی شده شامل چند کارخانه تولید کننده، چند توزیع کننده، کانال مستقیم (مشتریان منطقه ۱) و کانال غیرمستقیم (مشتریان منطقه ۲) است. ساختار زنجیره تأمین مورد نظر مطابق با شکل (۱) می باشد.



شکل (۱): نمای کلی زنجیره تأمین طراحی شده

مشتریان منطقه ۱ از طریق کانال مستقیم (اینترنتی) به کارخانه ها سفارش می دهند. ارسال کالا فقط از طریق یک نوع وسیله حمل، در مدت زمان کمتر، با آلاینده گی بیشتر و با هزینه بیشتر نسبت به کانال غیرمستقیم انجام می شود. در صورتی که زنجیره تأمین چنددوره ای باشد، موجودی ها نزد عرضه کننده اصلی متمرکز است. مشتریان منطقه ۲ از طریق کانال سنتی و واسطه خرده فروش سفارش خود را به زنجیره تأمین می دهند. ارسال کالا در این کانال فروش از طریق چند نوع وسیله حمل و نقل صورت می گیرد که میزان انتشار گاز کربن دی اکسید و هزینه های ثابت و متغیر برای حمل محصول در آن ها متفاوت است. مدل MINLP حاصل شده به صورت تک دوره ای، تک محصولی و چندسطحی است. باتوجه به تک دوره ای بودن زنجیره تأمین مورد نظر از موجودی کالا و هزینه های مربوط به نگهداری آن در مراکز تولید و توزیع چشم پوشی شده است. همچنین تمامی هزینه های ثابت برای طول یک دوره محاسبه شده است. در این مدل تقاضای مشتریان اولیه، زمان تحویل کالا به مشتری نهایی و مقدار انتشار گاز کربن دی اکسید حاصل از تولید و حمل و نقل محصولات متأثر

وسیله حمل و نقل  $l$   
 قیمت فروش به‌ازای هر واحد محصول در بازار  $k_1$   $Pr'$   
 قیمت فروش به‌ازای هر واحد محصول در بازار  $k_2$   $Pr$   
 تعداد وسیله حمل و نقل  $l$  از کارخانه  $i$  به توزیع کننده  $j$   $NY_{ijl}$   
 تعداد وسیله حمل و نقل  $l$  از کارخانه  $i$  به بازار  $k_1$   $NX_{ik_1l}$   
 تعداد وسیله حمل و نقل  $l$  از توزیع کننده  $j$  به بازار  $k_2$   $NZ_{jk_2l}$

۳-۳. توابع هدف

در این بخش مدل برنامه‌ریزی ریاضی دو هدفه پیشنهادی ارائه می‌شود که دارای دو تابع هدف اقتصادی و زیست‌محیطی است. تابع هدف اول به‌منظور بیشینه‌سازی سود کل طراحی زنجیره‌تأمین است که شامل اجزای زیر است:

درآمد حاصل از فروش محصولات:

$$\sum_{i,k_1,l} Pr' \cdot QX_{ik_1l} + \sum_{j,k_2,l} Pr \cdot QZ_{jk_2l} \quad (1)$$

هزینه ثابت احداث کارخانه و مراکز توزیع:

$$\sum_i FP_i \cdot V_i + \sum_j FD_j \cdot W_j \quad (2)$$

هزینه تولید:

$$\sum_{i,j,l} (PC_i \cdot QY_{ijl}) + \sum_{i,k_1,l} (PC_i \cdot QX_{ik_1l}) \quad (3)$$

هزینه ثابت حمل و نقل:

$$\sum_{i,j,l} (NY_{ijl} \cdot TF_l) + \sum_{i,k_1,l} (NX_{ik_1l} \cdot TF_l) + \sum_{j,k_2,l} (NZ_{jk_2l} \cdot TF_l) \quad (4)$$

هزینه متغیر حمل و نقل:

$$\sum_{i,j,l} (NY_{ijl} \cdot DY_{ijl} \cdot TV_l) + \sum_{i,k_1,l} (NX_{ik_1l} \cdot DX_{ik_1l} \cdot TV_l) + \sum_{j,k_2,l} (NZ_{jk_2l} \cdot DZ_{jk_2l} \cdot TV_l) \quad (5)$$

هزینه کمبود (فروش از دست‌رفته):

$$\sum_{k_1} PI_{k_1} \left( D'_{k_1} - \sum_{i,l} QX_{ik_1l} \right) + \sum_{k_2} PD_{k_2} \left( D_{k_2} - \sum_{j,l} QZ_{jk_2l} \right) \quad (6)$$

تابع هدف اول مسأله، سود کل که از تفاضل عبارات (۲) تا (۶) از عبارت (۱) به‌دست می‌آید را حداکثر می‌کند.

$Min (Z_2 =$

$$\sum_{i,j,k_1,l} \overline{GHP}_l (QX_{ik_1l} + QY_{ijl}) + \sum_{i,k_1,l} \overline{GHG}_l \cdot DX_{ik_1l} \cdot NX_{ik_1l} + \quad (7)$$

$$\sum_{i,j,l} \overline{GHG}_l \cdot DY_{ijl} \cdot NY_{ijl} + \sum_{j,k_2,l} \overline{GHG}_l \cdot DZ_{jk_2l} \cdot NZ_{jk_2l} )$$

عبارت (۷) تابع هدف دوم مدل با هدف حداقل کردن مقادیر انتشار گاز کربن دی‌اکسید در فعالیت‌های تولید و حمل و نقل بین تسهیلات زنجیره‌تأمین می‌باشد.

۳-۴. محدودیت‌ها

$$\sum_{i,l} QX_{ik_1l} \leq D'_{k_1} \quad \forall k_1 \quad (8)$$

زمان تحویل غیرقطعی از کارخانه  $i$  به بازار مستقیم  $k_1$  از طریق وسیله حمل و نقل  $l$   $\overline{LT}_{ik_1l}$

بیشینه زمان تحویل امکان‌پذیر برای بازار  $k_2$   $TZ_{k_2}$

بیشینه زمان تحویل امکان‌پذیر برای بازار  $k_1$   $TX_{k_1}$

حداکثر تعداد موجود از وسیله حمل و نقل  $l$  از کارخانه  $i$  به بازار  $k$   $NX_{ik_1l}^{max}$

حداکثر تعداد موجود از وسیله حمل و نقل  $l$  از کارخانه  $i$  به مرکز توزیع  $j$   $NY_{ijl}^{max}$

حداکثر تعداد موجود از وسیله حمل و نقل  $l$  از توزیع کننده  $j$  به بازار  $k_2$   $NZ_{jk_2l}^{max}$

مقدار غیرقطعی انتشار گاز کربن دی‌اکسید برای تولید هر واحد محصول در کارخانه  $i$   $\overline{GHP}_i$

میزان غیرقطعی انتشار گاز کربن دی‌اکسید برای وسیله حمل و نقل  $l$  به‌ازای واحد مسافت  $\overline{GHG}_l$

فاصله بین کارخانه  $i$  و مرکز توزیع  $j$   $DY_{ijl}$

فاصله بین مرکز توزیع  $j$  و بازار  $k_2$   $DZ_{jk_2l}$

فاصله بین کارخانه  $i$  و بازار  $k_1$   $DX_{ik_1l}$

حساسیت قیمتی تقاضا  $s$

درجه جانشینی بین دو کانال توزیع ( $0 \leq \beta \leq 1$ )  $\beta$

یک عدد با مقدار بزرگ  $M$

متغیرها:

متغیر باینری برابر با یک در صورتی که یک کارخانه باز در مکان کاندید  $i$  قرار بگیرد و در غیر این صورت صفر است.  $V_i$

متغیر باینری برابر با یک در صورتی که یک مرکز توزیع باز در مکان کاندید  $j$  قرار بگیرد و در غیر این صورت صفر است.  $W_j$

متغیر باینری برابر با یک در صورتی که از کارخانه  $i$  به بازار  $k_1$  ارسال انجام گیرد و در غیر این صورت صفر است.  $X_{ik_1l}$

متغیر باینری برابر با یک در صورتی که از کارخانه  $i$  به توزیع کننده  $j$  ارسال انجام گیرد و در غیر این صورت صفر است.  $Y_{ijl}$

متغیر باینری برابر با یک در صورتی که از توزیع کننده  $j$  به بازار  $k_2$  ارسال انجام گیرد و در غیر این صورت صفر است.  $Z_{jk_2l}$

مقدار تقاضای مشتری  $k_2$  در کانال غیرمستقیم (سنی)  $D_{k_2}$

مقدار تقاضای مشتری  $k_1$  در کانال مستقیم (مدرن)  $D'_{k_1}$

میزان کالای ارسالی از کارخانه  $i$  به توزیع کننده  $j$  از طریق وسیله حمل و نقل  $l$   $QY_{ijl}$

کالای ارسالی از توزیع کننده  $j$  به بازار غیرمستقیم  $k_2$  از طریق وسیله حمل و نقل  $l$   $QZ_{jk_2l}$

میزان کالای ارسالی از کارخانه  $i$  به بازار  $k_1$  از طریق  $QX_{ik_1l}$

به بازارها می‌باشند. محدودیت‌های (۱۶)-(۲۱) بیانگر محدودیت تعداد وسایل حمل‌ونقل موجود بین دو تسهیل و استفاده آن‌ها در صورت ارسال می‌باشد. محدودیت‌های (۲۲)-(۲۴) بیان‌کننده ارتباط بین تعداد وسایل حمل‌ونقل استفاده شده و ظرفیت حمل وسایل حمل‌ونقل است و تضمین می‌کند که تعداد وسایلی که برای ارسال کالا از آن‌ها استفاده می‌شود باتوجه به مقدار کالای ارسالی بین تسهیلات قابل قبول باشد. محدودیت (۲۵) تابع تقاضای مشتریان در کانال مستقیم است و محدودیت (۲۶) تابع تقاضای مشتریان کانال غیرمستقیم را نشان می‌دهد. در شبکه‌های توزیع دوکاناله، تقاضا برای هر کانال یک متغیر وابسته به قیمت هر دو کانال است. پارامترهای  $S_1$  و  $S_2$  به ترتیب نشان‌دهنده کشش (حساسیت) قیمتی تقاضا<sup>۱</sup> در کانال مستقیم و کانال غیرمستقیم هستند و فرض می‌شود که  $S_1 > S_2$ . پارامترهای  $\beta_1$  و  $\beta_2$  نیز بیان‌کننده حساسیت قیمتی هر کانال توزیع به قیمت محصول در کانال دیگر می‌باشد و بیان‌گر میزانی از تقاضای جابه‌جا شده از کانال مستقیم به غیرمستقیم یا بالعکس است. فرض  $S > \beta$  نشان می‌دهد که هنگام افزایش قیمت واحد کالا، تعداد مشتریانی که در یک کانال توزیع از خرید منصرف می‌شوند بیش‌تر از مشتریانی است که از کانال توزیع مقابل به دلیل افزایش قیمت به این کانال می‌پیوندند. این فرضیات در ادبیات مشابه نیز در نظر گرفته شده‌اند ([۲۲]، [۲۳]، [۲۴]). پارامتر غیرقطعی  $DS$  اندازه بازار برای محصولات را در بازار مستقیم و غیرمستقیم نشان می‌دهد. محدودیت‌های (۲۷) و (۲۸) بازه متغیرهای تصمیم را نشان می‌دهد.

### ۳-۵. خطی‌سازی

عبارت (۱) به صورت حاصل ضرب یک متغیر عدد صحیح در یک متغیر پیوسته می‌باشد که منجر به غیرخطی شدن مدل می‌شود. برای خطی کردن مدل، متغیرهای  $QX_{ik_1l}$  و  $QZ_{jk_2l}$  با کمک روابط (۲۹) تا (۳۱) به صورت مجموعه‌ای از متغیرهای صفر و یک نوشته می‌شوند.

$$QX_{ik_1l} = \sum_{r=0}^{n-1} 2^r y_r + (UB - 2^n + 1) y_n \quad (29)$$

$$Q < UB \quad (30)$$

$$2^n < UB < 2^{n+1} \quad (31)$$

که  $y_{rik_1l}$  (برای  $r=0, \dots, n-1$ ) و  $y_n$  (برای  $r=n$ ) متغیرهای صفر و یک، و  $UB$  حد بالای مقدار کالای ارسالی به هر بازار است که در مسأله موردنظر ما برابر با مقدار تقاضای هر کدام از بازارهای مستقیم و غیرمستقیم می‌باشد. با اعمال تغییرات فوق، جمله اول عبارت غیرخطی (۱) به صورت رابطه (۳۲) بازنویسی می‌شود.

$$\sum_{r=0}^{n-1} 2^r \cdot Pr' \cdot y_{rik_1l} + (UB - 2^n + 1) \cdot Pr' \cdot y_n \quad (32)$$

رابطه (۳۲) شامل حاصل ضرب متغیر باینری در یک متغیر پیوسته و همچنان غیرخطی است. بنابراین فرض می‌کنیم:

$$UP_{rik_1l} = Pr' \cdot y_{rik_1l} \quad (33)$$

و در نهایت، با اعمال تغییرات فوق، عبارت (۱) در تابع هدف  $f_1$  به صورت

$$\sum_{i,l} QZ_{jk_2l} \leq D_{k_2} \quad \forall k_2 \quad (9)$$

$$\sum_{k_2,l} QZ_{jk_2l} \leq \sum_{i,l} QY_{ijl} \quad \forall j \quad (10)$$

$$\sum_{k_1,l} QX_{ik_1l} + \sum_{i,l} QY_{ijl} \leq CPP_r \cdot V_i \quad \forall i \quad (11)$$

$$\sum_{i,l} QY_{ijl} \leq CPD_j \cdot W_j \quad \forall j \quad (12)$$

$$\sum_{i,l} QY_{ijl} \leq M \cdot W_j \quad \forall j \quad (13)$$

$$X_{ik_1l} \cdot \bar{L}T_{ik_1l} \leq TX_{k_1} \quad \forall i, k_1, l \quad (14)$$

$$Z_{jk_2l} \cdot \bar{L}T_{jk_2l} \leq TZ_{k_2} \quad \forall j, k_2, l \quad (15)$$

$$NX_{ik_1l} \leq X_{ik_1l} \cdot NX_{ik_1l}^{max} \quad \forall i, k_1, l \quad (16)$$

$$NY_{ijl} \leq Y_{ijl} \cdot NY_{ijl}^{max} \quad \forall i, j, l \quad (17)$$

$$NZ_{jk_2l} \leq Z_{jk_2l} \cdot NZ_{jk_2l}^{max} \quad \forall j, k_2, l \quad (18)$$

$$\frac{X_{ik_1l}}{NX_{ik_1l}^{max}} \leq NX_{ik_1l} \leq X_{ik_1l} \cdot NX_{ik_1l}^{max} \quad \forall i, k_1, l \quad (19)$$

$$\frac{Y_{ijl}}{NY_{ijl}^{max}} \leq NY_{ijl} \leq Y_{ijl} \cdot NY_{ijl}^{max} \quad \forall i, j, l \quad (20)$$

$$\frac{Z_{jk_2l}}{NZ_{jk_2l}^{max}} \leq NZ_{jk_2l} \leq Z_{jk_2l} \cdot NZ_{jk_2l}^{max} \quad \forall j, k_2, l \quad (21)$$

$$NX_{ik_1l} - 1 + \frac{1}{M} \leq \frac{QX_{ik_1l}}{VL_l} \leq NX_{ik_1l} \quad \forall i, k_1, l \quad (22)$$

$$NY_{ijl} - 1 + \frac{1}{M} \leq \frac{QY_{ijl}}{VL_l} \leq NY_{ijl} \quad \forall i, j, l \quad (23)$$

$$NZ_{jk_2l} - 1 + \frac{1}{M} \leq \frac{QZ_{jk_2l}}{VL_l} \leq NZ_{jk_2l} \quad \forall j, k_2, l \quad (24)$$

$$D'_{k_1} = \overline{DS}_1 - s_1 Pr' + \beta_1 Pr \quad \forall k_1, k_2 \quad (25)$$

$$D_{k_2} = \overline{DS}_2 - s_2 Pr' + \beta_2 Pr' \quad \forall k_1, k_2 \quad (26)$$

$$QY_{ijl}, QZ_{jk_2l}, QX_{ik_1l}, Pr, Pr' \geq 0 \quad \forall i, j, l, k_1, k_2 \quad (27)$$

$$Y_{ijl}, X_{ik_1l}, Z_{jk_2l}, V_i, W_j \in \{0, 1\} \quad \forall i, j, l, k_1, k_2 \quad (28)$$

محدودیت (۸) و (۹) مرتبط با برآورده کردن تقاضای مشتریان در کانال مستقیم و غیرمستقیم می‌باشد، درحالی‌که فروش از دست‌رفته در هر دو کانال فروش امکان‌پذیر می‌باشد. محدودیت (۱۰) تضمین می‌کند که مقدار جریان خروجی از توزیع‌کنندگان به بازار دوم کمتر از جریان ورودی به آن باشد. محدودیت (۱۱) بیان می‌کند که مجموع جریان خروجی از کارخانه‌ها از مقدار ظرفیت تولید کارخانه تجاوز نکند، و زمانی اتفاق بیفتد که کارخانه باز باشد. محدودیت (۱۲) تضمین می‌کند که مجموع جریان ورودی به توزیع‌کنندگان از ظرفیت آن‌ها تجاوز نکند و در صورتی انجام شود که تسهیل توزیع‌کننده باز باشد. محدودیت (۱۳) تضمین می‌کند که ارسال محصول از کارخانه به توزیع‌کننده در صورتی انجام شود که مرکز توزیع باز باشد. محدودیت‌های (۱۴) و (۱۵) مرتبط با محدودیت زمان تحویل محصول

1. Price elasticity of demand

زیر بازنویسی می‌شود:

$$EV(\tilde{c}) = \frac{E_1^c + E_1^o}{2} = \frac{c^p + \tau c^m + c^o}{2} \quad (43)$$

برای هر دو عدد فازی  $\tilde{a}$  و  $\tilde{b}$  درجه عضویت بزرگ‌تر بودن  $\tilde{a}$  از  $\tilde{b}$  به شکل زیر تعریف می‌شود:

$$\mu_M(\tilde{a}, \tilde{b}) = \begin{cases} \cdot & \text{if } E_1^a - E_1^b < \cdot \\ \frac{E_1^a - E_1^b}{E_1^a - E_1^b - (E_1^a - E_1^b)} & \text{if } \cdot \in [E_1^a - E_1^b, E_1^a - E_1^b] \\ \cdot & \text{if } E_1^a - E_1^b > \cdot \end{cases} \quad (44)$$

هنگامی که  $\mu_M(\tilde{a}, \tilde{b}) \geq \alpha$  باشد، گفته می‌شود  $\tilde{a}$  حداقل با درجه  $\alpha$  بزرگ‌تر یا مساوی  $\tilde{b}$  است و به صورت  $\tilde{a} \geq_\alpha \tilde{b}$  نمایش داده می‌شود. برای هر جفت از اعداد فازی  $\tilde{a}$  و  $\tilde{b}$  گفته می‌شود که  $\tilde{a}$  با  $\tilde{b}$  به احتمال  $\alpha$  مساوی است اگر روابط زیر هم‌زمان برقرار باشد:

$$\tilde{a} \geq_\alpha \tilde{b} \quad \text{و} \quad \tilde{a} \leq_\alpha \tilde{b} \quad (45)$$

رابطه (۴۵) معادل رابطه (۴۶) است.

$$\frac{\alpha}{r} \leq \mu_M(\tilde{a}, \tilde{b}) \leq 1 - \frac{\alpha}{r} \quad (46)$$

با استفاده از تعاریف EI و EV عدد فازی، مدل قطعی کمکی معادل مدل طراحی شبکه زنجیره تأمین سبز دوکاناله پیشنهادی به صورت زیر فرموله می‌شود:

$$\begin{aligned} & \min \left( Z_2 \right) \\ & = \sum_{i,j,k_1,l} \left( \frac{GHP_i^p + 2GHP_i^m + GHP_i^o}{4} \right) (QX_{ik_1l} + QY_{ijl}) \\ & + \sum_{i,k_1,l} \left( \frac{GHG_i^p + 2GHG_i^m + GHG_i^o}{4} \right) DX_{ik_1l} \cdot NX_{ik_1l} \quad (47) \\ & + \sum_{i,j,l} \left( \frac{GHG_i^p + 2GHG_i^m + GHG_i^o}{4} \right) DY_{ijl} \cdot NY_{ijl} \\ & + \sum_{j,k_2,l} \left( \frac{GHG_j^p + 2GHG_j^m + GHG_j^o}{4} \right) DZ_{jk_2l} \cdot NZ_{jk_2l} \end{aligned}$$

s.t.

$$\left[ \left( \frac{\alpha}{2} \right) \frac{DS_1^o + DS_1^m}{2} + \left( 1 - \frac{\alpha}{2} \right) \frac{DS_1^p + DS_1^m}{2} \right] - S_1 Pr' + \beta_1 Pr \leq D'_{K_1} \quad \forall k_1, k_2 \quad (48)$$

$$\left[ \left( 1 - \frac{\alpha}{2} \right) \frac{DS_1^o + DS_1^m}{2} + \left( \frac{\alpha}{2} \right) \frac{DS_1^p + DS_1^m}{2} \right] - S_1 Pr' + \beta_1 Pr \geq D'_{K_1} \quad \forall k_1, k_2$$

$$\left[ \left( \frac{\alpha}{2} \right) \frac{DS_2^o + DS_2^m}{2} + \left( 1 - \frac{\alpha}{2} \right) \frac{DS_2^p + DS_2^m}{2} \right] - S_2 Pr + \beta_2 Pr' \leq D_{K_2} \quad \forall k_1, k_2 \quad (49)$$

$$\left[ \left( 1 - \frac{\alpha}{2} \right) \frac{DS_2^o + DS_2^m}{2} + \left( \frac{\alpha}{2} \right) \frac{DS_2^p + DS_2^m}{2} \right] - S_2 Pr + \beta_2 Pr' \geq D_{K_2} \quad \forall k_1, k_2$$

$$\left[ \alpha \frac{LT_{jk_2l}^m + LT_{jk_2l}^o}{2} + (1-\alpha) \frac{LT_{jk_2l}^p + LT_{jk_2l}^m}{2} \right] Z_{jk_2l} \leq TZ_{k_2} \quad \forall j, k_2, l \quad (50)$$

$$\left[ \alpha \frac{LT_{ik_1l}^m + LT_{ik_1l}^o}{2} + (1-\alpha) \frac{LT_{ik_1l}^p + LT_{ik_1l}^m}{2} \right] X_{ik_1l} \leq TX_{k_1} \quad \forall i, k_1, l \quad (51)$$

$$\sum_r \sum_{i,k_1,l}^{n-1} 2^r \cdot UP_{rik_1l} + \sum_{i,k_1,l} (UB - 2^n + 1) UP_{nik_1l} \quad (34)$$

$$+ \sum_r \sum_{j,k_2,l}^{n-1} 2^r \cdot UP_{rjk_2l} + \sum_{j,k_2,l} (UB - 2^n + 1) UP_{nj k_2l}$$

و در ادامه قیود زیر نیز به محدودیت‌های مدل اضافه می‌گردد:

$$QX_{ik_1l} = \sum_{r=0}^{n-1} 2^r y_{rik_1l} + (UB_{K_1} - 2^n + 1) y_{nik_1l} \quad \forall i, k_1, l \quad (35)$$

$$Pr' - [(1 - y_{rik_1l}) M] \leq UP_{rik_1l} \leq Pr' \quad \forall r, i, k_1, l \quad (36)$$

$$UP_{rik_1l} \leq y_{rik_1l} \cdot M \quad \forall r, i, k_1, l \quad (37)$$

$$QZ_{jk_2l} = \sum_{r=0}^{n-1} 2^r y_{rjk_2l} + (UB_{K_2} - 2^n + 1) y_{nj k_2l} \quad \forall j, k_2, l \quad (38)$$

$$Pr - [(1 - y_{rjk_2l}) M] \leq UP_{rjk_2l} \leq Pr \quad \forall r, j, k_2, l \quad (39)$$

$$UP_{rjk_2l} \leq y_{rjk_2l} \cdot M \quad \forall r, j, k_2, l \quad (40)$$

### ۳-۶. روش حل

به منظور حل مدل چندهدفه فازی پیشنهادی که شامل ضرایب غیردقیق هم در تابع هدف و هم در محدودیت‌ها است از یک رویکرد حل دومرحله‌ای استفاده شده است. در مرحله اول با استفاده از روش امکانی استفاده شده در پژوهش پیشوایی و ترابی [۲۵] که ترکیبی است از روش‌های استفاده شده توسط جیمنز و همکاران [۲۶] و پارا و همکاران [۲۷] مدل اصلی به یک مدل قطعی کمکی معادل تبدیل شده است. رویکرد مذکور بر مبنای مفاهیم ریاضیاتی قوی از جمله «بازه انتظاری» و «ارزش انتظاری» می‌باشد و از لحاظ محاسباتی بسیار کارآمد است، زیرا خاصیت خطی بودن را حفظ می‌کند و همچنین تعداد توابع هدف و محدودیت‌های نامساوی را افزایش نمی‌دهد. در مرحله دوم از رویکرد برنامه‌ریزی چندهدفه فازی تعاملی پیشنهاد شده توسط ترابی و هسینی [۲۸] تحت عنوان روش TH جهت تک‌هدفه ساختن مدل و به دست آوردن مجموعه جواب بهینه پارتو استفاده شده است.

### ۳-۶-۱. مدل قطعی معادل

روش جیمنز و همکاران [۲۶] بر اساس تعریف «بازه مورد انتظار» و «مقدار مورد انتظار» یک عدد فازی شکل گرفته است. معادله (۴۱) به منزله تابع عضویت عدد فازی مثلثی  $\tilde{C}$  تعریف می‌شود:

$$\mu_{\tilde{C}}(x) = \begin{cases} f_c(x) = \frac{x - c^p}{c^m - c^p} & \text{if } c^p \leq x \leq c^m \\ 1 & \text{if } x = c^m \\ g_c(x) = \frac{c^o - x}{c^o - c^m} & \text{if } c^m \leq x \leq c^o \\ \cdot & \text{if } x \leq c^p \text{ or } x \geq c^o \end{cases} \quad (41)$$

مطابق با جیمنز و همکاران [۲۶] بازه مورد انتظار (EI) و مقدار مورد انتظار (EV) یک عدد فازی به صورت زیر تعریف می‌شود:

$$EI(\tilde{C}) = [E_c^o, E_c^p] = \left[ \int_{c^p}^1 f_c^{-1}(x) dx, \int_0^1 g_c^{-1}(x) dx \right] \quad (42)$$

شود توقف حل و در غیر این صورت رفتن به گام ۳ و به دست آوردن جوابی جدید.

#### ۴. نتایج حل مدل

در این بخش به منظور اعتبارسنجی مدل پیشنهادی و روش حل، اعتبار مدل با یک آزمایش عددی و با استفاده از نرم افزار IBM ILOG CPLEX ارزیابی می شود. برای تولید اعداد فازی مثلثی، ابتدا محتمل ترین مقدار هر پارامتر ( $C^m$ ) به صورت تصادفی با استفاده از جدول (۱) تولید می شود. سپس با استفاده از توزیع یکنواخت دو عدد تصادفی ( $r_1, r_2$ ) بین  $0/2$  و  $0/8$  تولید می شود و مقادیر بدبینانه ( $C^p$ ) و خوش بینانه ( $C^o$ ) از عدد فازی با روابط زیر محاسبه می شود ([۲۵]، [۲۹]).

$$C^o = (1+r_1)C^m \quad (56)$$

$$C^p = (1-r_2)C^m \quad (57)$$

جدول (۱): منبع تولید تصادفی مجموعه داده ها

پارامتر	توزیع تصادفی داده ها	پارامتر	توزیع تصادفی داده ها
$DS_1$	U (360,400)	$LT_{ik_1l}$	U (24,35)
$DS_2$	U (360,400)	$LT_{jk_2l}$	U (36,48)
$FP_i$	U (80000,90000)	$TX_{K_1}$	U (30,33)
$FD_j$	U (60000,70000)	$TZ_{K_2}$	U (40,45)
$PC_i$	U (200,205)	$GHP_i$	U (4.5, 5)
$TF_i$	U (70,90)	$GHG_l$	U (0.6,2.3)
$TV_i$	U (0.02,0.05)	$VL_l$	U (30,50)
$CPP_i$	U (200,250)	$NX_{ik_1l}^{max}$	U (5,8)
$CPD_j$	U (100,110)	$NY_{ijl}^{max}$	U (5,8)
$PI_{k_1}$	U (50,90)	$NZ_{jk_2l}^{max}$	U (5,8)
$PD_{k_2}$	U (50,75)		

برای تخمین اندازه پارامترهای  $GHP_i$  و  $GHG_l$  از اطلاعات جدول (۲) استفاده شده است که سطح انتشار گازهای گلخانه ای برای انواع مختلف وسایل حمل و نقل را در حالت حمل و نقل جاده ای با در نظر گرفتن ظرفیت حمل آن ها و برحسب واحد مسافت ارائه می دهد.

بفرض در نظر گرفتن اهمیت نسبی بالاتر تابع هدف اول، برای حل مسأله نمونه مقادیر  $(\theta_1, \theta_2)$  را برابر با  $(0/3, 0/7)$  قرار داده ایم. با توجه به این که برای تصمیم گیری در مسأله حاضر رسیدن به جواب های غیرمتعادل با درجه بالاتری از ارضای تابع هدف اول مورد نظر است مقدار پارامتر  $\gamma$  را  $0/4$  تنظیم کرده ایم. مقدار اجزای توابع هدف و درجه ارضای آن ها در روش TH پس از حل مسأله نمونه با پارامترهای جدول (۱) در جدول (۳) گزارش شده است.

متغیرهای تصمیم مسأله شامل تقاضای مربوط به بازارهای مستقیم و غیرمستقیم، قیمت محصول در هر بازار، متغیر جریان کالا بین تسهیلات زنجیره تأمین و تعداد و نوع وسایل حمل و نقل استفاده شده برای حمل کالا در شکل (۲) نشان داده شده است.

معادلات نوشته شده به ترتیب معادل تابع هدف فازی (۷) و محدودیت های فازی (۱۴)، (۱۵)، (۲۵) و (۲۶) می باشند.

#### ۳-۲. رویکرد حل فازی

در روش حل پیشنهادی برای حل مدل ریاضی غیرقطعی و چندهدفه، از یک رویکرد حل دومرحله ای که ترکیبی از برنامه ریزی امکانی ارائه شده در بخش قبل و روش TH می باشد استفاده شده است. مزیت اصلی این روش انعطاف پذیری بالا و توانایی اندازه گیری و تغییر درجه ارضای اهداف براساس اولویت تصمیم گیر است. در بخش قبل به مدل کمکی قطعی معادل رسیدیم. در این مرحله مدل قطعی معادل چندهدفه به یک مدل تک هدفه براساس اولویت های تصمیم گیر تبدیل می شود. گام های این روش به صورت زیر است:

**گام ۱:** تعیین توزیع های امکانی مثلثی برای پارامترهای مبهم مسأله و فرمول بندی مدل برنامه ریزی خطی عدد صحیح مختلط چندهدفه امکانی.

**گام ۲:** تبدیل توابع هدف مبهم به توابع هدف قطعی با استفاده از مقدار مورد انتظار مطابق با پارامترهای غیردقیق.

**گام ۳:** تعیین مقدار  $\alpha$  و غیرفازی کردن محدودیت ها و فرموله کردن مدل قطعی کمکی معادل.

**گام ۴:** تعیین جواب ایده آل  $\alpha$ -مثبت<sup>۱</sup> ( $\alpha$ -PIS) و جواب ایده آل  $\alpha$ -منفی<sup>۲</sup> ( $\alpha$ -NIS) برای هر تابع هدف و سطح  $\alpha$ -شدنی.

**گام ۵:** تعیین تابع عضویت خطی برای هر تابع هدف، که برای توابع هدف به صورت روابط (۵۲) است.

$$\mu_1(x) = \begin{cases} 1 & \text{if } z_1 < z_1^{\alpha-PIS} \\ \frac{z_1^{\alpha-NIS} - z_1}{z_1^{\alpha-NIS} - z_1^{\alpha-PIS}} & \text{if } z_1^{\alpha-PIS} \leq z_1 \leq z_1^{\alpha-NIS} \\ 0 & \text{if } z_1 > z_1^{\alpha-NIS} \end{cases} \quad (52)$$

$$\mu_2(x) = \begin{cases} 1 & \text{if } z_2 > z_2^{\alpha-PIS} \\ \frac{z_2 - z_2^{\alpha-NIS}}{z_2^{\alpha-PIS} - z_2^{\alpha-NIS}} & \text{if } z_2^{\alpha-NIS} \leq z_2 \leq z_2^{\alpha-PIS} \\ 0 & \text{if } z_2 < z_2^{\alpha-NIS} \end{cases}$$

**گام ۶:** تبدیل مدل خطی عدد صحیح مختلط قطعی چندهدفه به یک مدل تک هدفه، با استفاده از تابع تجمعی ترابی و هسینی [۲۸].

$$\max \lambda(x) = \gamma \lambda. + (1-\gamma) \sum_h \theta_h \mu_h(x) \quad (53)$$

s.t.

$$\lambda. < \mu_h(x), \quad h=1,2 \quad (54)$$

$$x \in F(x), \quad \lambda. \text{ and } \lambda \in [0,1] \quad (55)$$

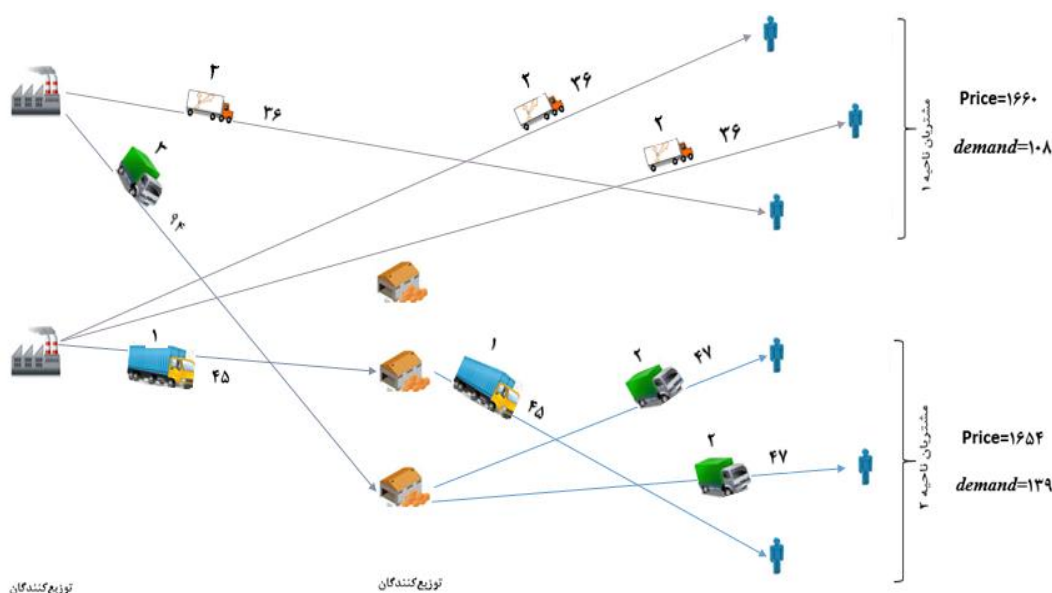
به طوری که  $F(x)$  ناحیه شدنی شامل متغیرهای مدل قطعی معادل، و  $\mu_h(x)$  درجه ارضای تابع هدف  $h$ ام را نشان می دهد.  $\theta_h$  و  $\gamma$  به ترتیب اهمیت تابع هدف  $h$ ام و ضریب جبران را مشخص می کند.

**گام ۷:** تعیین مقادیر  $\gamma$  و  $\theta_h$  و حل کردن مدل برنامه ریزی خطی عدد صحیح مختلط تک هدفه مربوطه. اگر تصمیم گیر با جواب فعلی قانع



جدول (۲): سطح انتشار گازهای گلخانه‌ای برای وسایل مختلف حمل‌ونقل [۱۰]

	Vehicle type	Shipment weight [ton]	Distance [km]	Transport work [tkm]	CO <sub>2</sub> [kg]
۱	Van petrol	۵/۰	۱۲۰/۰۰	۶۰۰/۰۰	۱۹/۳۲۰
۲	Van diesel	۵/۰	۱۲۰/۰۰	۶۰۰/۰۰	۶۲۱/۰۰
۳	Small truck	۵/۰	۱۲۰/۰۰	۶۰۰/۰۰	۱۵۱/۲۰
۴	Medium truck	۵/۰	۱۲۰/۰۰	۶۰۰/۰۰	۱۰۶/۲۰
۵	Heavy truck	۵/۰	۱۲۰/۰۰	۶۰۰/۰۰	۷۴/۴۰
۶	Tractor + city trailer	۵/۰	۱۲۰/۰۰	۶۰۰/۰۰	۷۳/۸۰
۷	Truck + trailer	۵/۰	۱۲۰/۰۰	۶۰۰/۰۰	۴۴/۴۰
۸	Tractor + semitrailer	۵/۰	۱۲۰/۰۰	۶۰۰/۰۰	۳۷/۸۰
۹	Tractor + megatrailer	۵/۰	۱۲۰/۰۰	۶۰۰/۰۰	۳۴/۸۰



شکل (۲): شبکه زنجیره تامین خروجی مدل برای مسأله نمونه

به‌منظور قیمت‌گذاری کانال‌های توزیع، مقدار حساسیت قیمتی تقاضا برای مشتریان ( $S$ ) و همچنین درجه جانمایی کانال‌های توزیع ( $\beta$ ) برای کانال توزیع مستقیم بزرگتر در نظر گرفته شده است، یعنی  $(\beta_1, \beta_2) = (0.3, 0.2)$  و  $(S_1, S_2) = (0.5, 0.4)$ . مشخص است که مقدار تقاضا و کالای ارسالی در کانال توزیع مستقیم کمتر از کانال سنتی است. همچنین در مسأله نمونه حل شده میزان آلاینده‌گی و انتشار CO<sub>2</sub> در وسایل حمل‌ونقل بازار مستقیم به‌دلیل نوع وسیله انتخاب شده بالاتر در نظر گرفته شده است. به‌همین دلیل مدل تمایل به ارسال کالای کمتر به بازار اول را نشان می‌دهد که با توجه به آن قیمت‌های بهینه در کانال‌ها نیز تعیین شده است. از آنجاکه تقاضا برای هر کانال یک متغیر وابسته به قیمت هر دو کانال است، تفاوت بین قیمت‌ها در دو کانال نیز می‌تواند موجب جابه‌جایی تقاضای مشتریان بین دو کانال توزیع گردد. بالاتر بودن حساسیت تقاضا نسبت به قیمت در کانال مستقیم موجب تأثیر پذیری بیشتر تقاضای مشتریان آنلاین به قیمت‌ها می‌گردد.

جدول (۳): مقادیر توابع هدف مسأله نمونه

$$(\theta_1, \theta_2) = (0.7, 0.3) - \gamma = 0.4 - \alpha = 0.9$$

توابع هدف	مقادیر تابع هدف	مقادیر اجزای توزیع هدف	مقادیر تابع هدف	درجه رضایت‌مندی توابع هدف $\mu_h(x)$
درآمد حاصل از فروش	۴۰۹۱۹۰			
هزینه ثابت احداث تسهیلات	۳۰۷۷۲۰			
هزینه تولید	۴۹۴۰۰			
هزینه ثابت حمل‌ونقل	۱۲۹۰		۵۰۷۱۷	۰/۸۷۲
هزینه متغیر حمل‌ونقل	۵۹/۴۶			
هزینه کمبود	۰			
مقادیر انتشار CO <sub>2</sub>	۸۰۷۳/۹		۸۰۷۳/۹	۰/۵۲۹

جدول (۴): مقادیر متغیر تعداد و نوع وسیله حمل و نقل در خروجی مدل

مراکز توزیع	مشتریان کانال مستقیم (k <sub>1</sub> )			مشتریان کانال غیرمستقیم (k <sub>2</sub> )		
	۱	۲	۳	۱	۲	۳
تولیدکننده	۰	۰	۲-۱	۰	۰	۰
	۰	۱-۳	۰	۰	۰	۰
مراکز توزیع	۰	۰	۰	۰	۰	۰
	۰	۰	۰	۰	۰	۰
	۰	۰	۰	۰	۰	۰
	۰	۰	۰	۰	۰	۰
	۰	۰	۰	۰	۰	۰
	۰	۰	۰	۰	۰	۰
	۰	۰	۰	۰	۰	۰

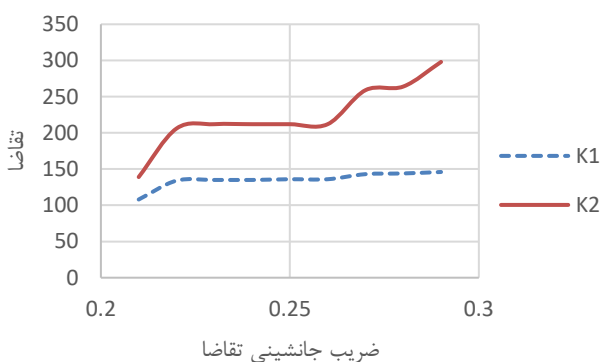
که در صورت برابر بودن هزینه‌های حمل و نقل برای ارسال کالا به هردو بازار، از وسایل حمل و نقلی که مقدار انتشار گاز کربن دی‌اکسید در آن‌ها کم‌تر است، استفاده بیش‌تری شده و بنابراین به بازار اول نسبت به مسأله اول محصول کمتری ارسال شده است. با بالاتر رفتن اختلاف تقاضای دو کانال، اختلاف بیش‌تر قیمت‌های بهینه نیز مشهود می‌باشد.

### ۵. تحلیل حساسیت

در این بخش حساسیت مقادیر توابع هدف نسبت به ضرایب موجود در رابطه قیمت-تقاضا و تابع تجمعی TH سنجیده خواهد شد و نتایج حاصل شامل مقادیر مربوط به توابع هدف و درجه ارضای آن‌ها و متغیرهای قیمت و تقاضا گزارش می‌شود.

#### ۵-۱. تحلیل حساسیت مدل بر اساس پارامترهای رابطه قیمت-تقاضا

بر اساس ابعاد و پارامترهای ذکر شده در بخش قبل، تحلیل حساسیت بر روی پارامترهای  $s$  و  $\beta$  انجام شده است. در ابتدا برای مقادیر مختلف پارامتر  $\beta$  مقادیر بهینه  $Pr$ ،  $Pr'$ ،  $D'_{k_1}$ ،  $D_{k_2}$ ، توابع هدف و درجه رضایت‌مندی اهداف در جدول (۶) گزارش شده است. برای انجام این آزمایش عددی حساسیت قیمتی تقاضا برای بازار اول و دوم برابر با ۰/۴ فرض شده است.



شکل (۳): اثر ضریب جانشینی تقاضا ( $\beta$ ) بر تقاضای کانال‌ها

نتایج جدول (۶) نشان می‌دهد که در صورت برابر بودن ضریب جانشینی در هر دو کانال توزیع و متقارن بودن مقدار تقاضای جابه‌جا شده بین دو بازار آنلاین و سنتی، در صورت افزایش این ضریب، مقدار تقاضا در هر دو کانال توزیع افزایش پیدا کرده است (شکل (۳)) و بر همین اساس مقدار قیمت بهینه تعیین شده نیز متناسب با افزایش

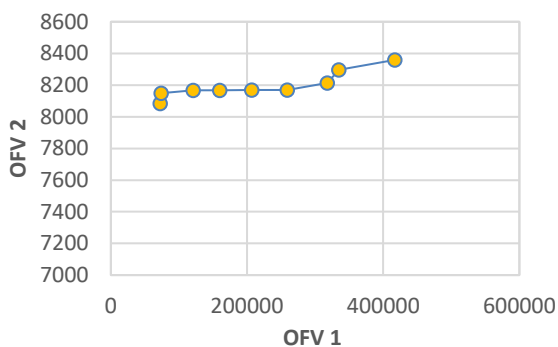
تعداد و نوع وسایل حمل و نقل استفاده شده در جدول (۴) گزارش شده است، به‌صورتی که عدد اول در هر سلول جدول تعداد وسیله حمل و نقل و عدد دوم نوع آن را نشان می‌دهد. برای مثال عدد ۳-۲ به این معناست که انتقال محصول از تولیدکننده ۱ به مرکز توزیع ۳ با ۲ عدد وسیله حمل و نقل نوع ۲ انجام گرفته شده است.

در مسأله آزمایشی موردنظر انتخاب وسایل حمل و نقل به شکلی صورت گرفته است که برای ارسال کالا به بازار مستقیم از وسایلی با ظرفیت کمتر و هزینه حمل کمتر استفاده شده است. با احتساب هزینه‌های ثابت و متغیر حمل و نقل و تعداد کالای ارسالی به هر کدام از بازارها، هزینه حمل به‌ازای هر واحد کالای ارسالی به بازار مستقیم برابر با ۴/۱۲ و بازار غیرمستقیم ۶/۵ واحد می‌باشد. از سوی دیگر مقدار CO<sub>2</sub> تولیدی توسط وسایل حمل و نقل استفاده شده در کانال توزیع مستقیم بیش‌تر از کانال سنتی است. با وجود شرایط فوق مقدار کالای ارسال شده در خروجی مسأله نمونه به بازار فروش غیرمستقیم بیش‌تر از بازار آنلاین می‌باشد. برای مشخص شدن میزان تأثیر هر یک از عوامل هزینه و میزان آلاینده‌گی وسایل حمل و نقل در تقاضای ایجاد شده هر یک از بازارها، مسأله نمونه دیگری با فرض برابر بودن هزینه‌های حمل و نقل ارسال کالا در هر دو بازار حل شده است که نتایج آن در جدول (۵) گزارش شده است.

جدول (۵): خروجی مدل مسأله آزمایشی ۲ در حالت برابر بودن

هزینه‌های حمل و نقل		
$(\theta_1, \theta_2) = (0.7, 0.3) - \gamma = 0.4 - \alpha = 0.9$		
کانال توزیع مستقیم	تقاضا	۲۹-۳۰-۲۹
	قیمت	۱۶۵۳
کانال توزیع غیرمستقیم	تقاضا	۵۳-۵۵-۵۳
	قیمت	۱۶۴۲
مقادیر توابع هدف	$f_1$	۵۰۷۴۲
	$f_2$	۸۰۸۸/۵
درجه رضایت‌مندی توابع هدف	$\mu_1$	۰/۹۱۹
	$\mu_2$	۰/۱۴۰

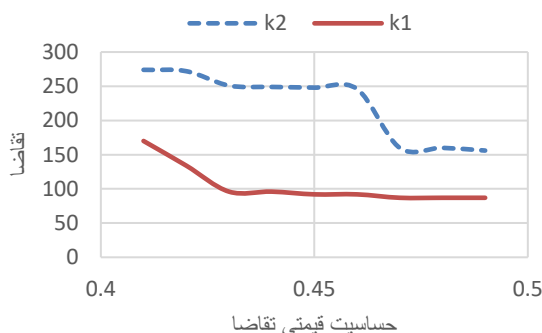
همان‌طور که نتایج جدول (۵) نشان می‌دهد با افزایش هزینه‌های حمل و نقل در کانال توزیع مستقیم، مقدار تقاضای این کانال نسبت به مسأله آزمایشی اول کاهش پیدا کرده است و اختلاف ناشی از تقاضا در بازار اول و دوم فقط به دلیل بالاتر بودن میزان آلاینده‌گی وسایل حمل و نقل در کانال توزیع مستقیم می‌باشد. این مسأله نشان می‌دهد



شکل (۵): مرز پارتوی مساله در تحلیل حساسیت (β)

در ادامه برای مقادیر مختلف پارامتر S مقادیر بهینه  $Pr'$ ,  $Pr$ ،  $D'_{k_1}$ ,  $D_{k_1}$ ، توابع هدف و درجه رضایت‌مندی اهداف تعیین شده است. برای انجام این آزمایش عددی پارامتر  $\beta$  برای کانال توزیع مستقیم و غیرمستقیم برابر با ۰.۳ فرض شده است.

همان‌طور که در جدول (۷) مشخص است با افزایش ضریب S مقدار تقاضای بازار مستقیم و غیرمستقیم نیز کاهش می‌یابد. روند کاهش تقاضا و قیمت در اثر افزایش ضریب حساسیت قیمت-تقاضا نشان می‌دهد که با کمتر شدن اختلاف قیمتی بین دو کانال، اختلاف تقاضا نیز کمتر شده است (شکل (۶) و (۷)). بنابراین در حالت کلی می‌توان انتظار داشت که به شرط برابر بودن همه شرایط در هر دو کانال توزیع، در صورت برابر بودن قیمت هر دو کانال، اندازه تقاضای مستقیم و غیرمستقیم تفاوتی نخواهد داشت. به دنبال کاهش یافتن تقاضا و قیمت، مقادیر بهینه تابع هدف اول و دوم نیز کاهش می‌یابد. شکل (۸) نشان می‌دهد که حساسیت تابع هدف اول نسبت به تغییرات ضریب حساسیت قیمتی تقاضا نیز بسیار بیشتر از تابع هدف دوم است.



شکل (۶): اثر حساسیت قیمتی تقاضا (S) بر تقاضای کانال‌های توزیع

۲-۵. تحلیل حساسیت مدل براساس پارامترهای تابع هدف تجمعی TH در این بخش خلاصه‌ای از نتایج آزمایش عددی براساس مقادیر مختلف پارامترهای  $\theta_n$  و  $\gamma$  در تابع هدف تجمعی روش TH که به ترتیب بیان‌کننده درجه اهمیت توابع هدف و کنترل حداقل درجه رضایت‌مندی توابع هدف می‌باشند در جدول (۸) گزارش شده است. باتوجه به اطلاعات جدول (۸) مشاهده می‌شود که با تغییر اندازه

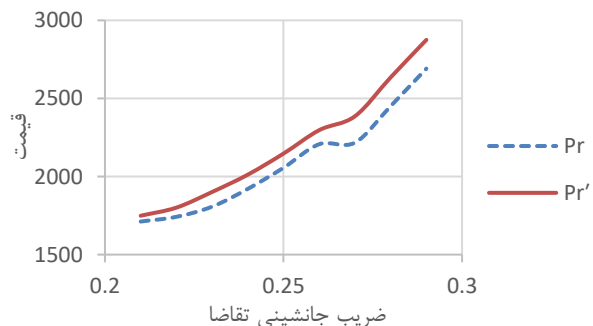
تقاضا بالاتر می‌رود (شکل (۴)). همان‌طور که مشخص است با افزایش اختلاف بین قیمت‌های بهینه در دو کانال توزیع، اختلاف بین تقاضا در بازارهای مستقیم و غیرمستقیم نیز بیش‌تر می‌شود. با افزایش تقاضا و قیمت مقدار توابع هدف اول و دوم نیز افزایش می‌یابد، بنابراین مقادیر بهتری برای تابع هدف اول و مقادیر بدتری برای تابع هدف دوم به دست می‌آید. همان‌طور که در شکل (۵) نیز نشان داده شده است، حساسیت تابع هدف اول نسبت به تغییرات ضریب جانشینی تقاضا و به دنبال آن تغییرات قیمت و تقاضا بسیار بیشتر از تابع هدف دوم است.

جدول (۶): مقادیر بهینه متغیرهای تصمیم و توابع هدف برای تحلیل

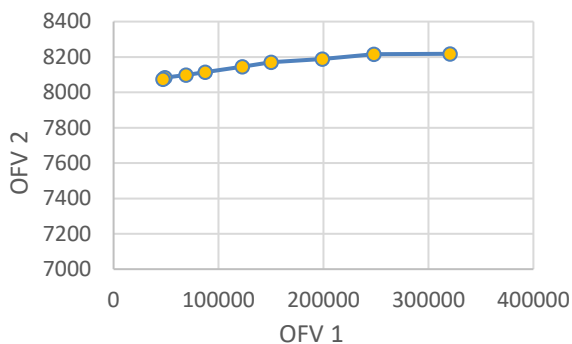
حساسیت پارامتر $\beta$								
$\beta$	$D_{k_1}$	$D_{k_2}$	$Pr'$	$Pr$	$f_1$	$f_2$	$\mu_1$	$\mu_2$
۰/۲۱	۱۰۸	۱۳۹	۱۷۴۹	۱۷۱۲	۷۲۶۵۶	۸۰۸۴/۱	۰/۹۹۸	۰/۵۳۴
۰/۲۲	۱۳۴	۲۰۶	۱۸۰۱	۱۷۴۲	۷۳۸۴۳	۸۱۴۹/۱	۰/۷۰۶	۰/۵۳۲
۰/۲۳	۱۳۵	۲۱۲	۱۹۰۱	۱۸۰۷	۱۲۰۸۸۰	۸۱۶۶/۶	۰/۸۱۸	۰/۵۳۰
۰/۲۴	۱۳۵	۲۱۲	۲۰۱۲	۱۹۲۱	۱۶۰۱۴۰	۸۱۶۷/۳	۰/۸۳۱	۰/۵۳۰
۰/۲۵	۱۳۶	۲۱۲	۲۱۴۷	۲۰۵۶	۲۰۷۰۵۰	۸۱۶۸/۹	۰/۸۵۲	۰/۵۳۷
۰/۲۶	۱۳۶	۲۱۲	۲۲۹۷	۲۲۰۷	۲۵۹۳۷۰	۸۱۶۸/۹	۰/۸۸۰	۰/۵۳۶
۰/۲۷	۱۴۳	۲۵۹	۲۳۸۶	۲۲۱۷	۳۱۸۱۹۰	۸۲۱۴/۱	۰/۸۱۷	۰/۵۳۳
۰/۲۸	۱۴۴	۲۶۴	۲۶۳۵	۲۴۵۱	۳۳۴۹۷۰	۸۲۹۶/۳	۰/۷۱۵	۰/۶۵۲
۰/۲۹	۱۴۶	۲۹۸	۲۸۷۵	۲۶۹۱	۴۱۷۱۵۰	۸۳۵۹/۱	۰/۷۰۵	۰/۶۷۰

جدول (۷): مقادیر بهینه متغیرهای تصمیم و توابع هدف برای تحلیل

حساسیت پارامتر s								
S	$D_{k_1}$	$D_{k_2}$	$Pr'$	$Pr$	$f_1$	$f_2$	$\mu_1$	$\mu_2$
۰/۴۱	۱۷۰	۲۷۴	۲۳۷۹	۲۲۲۴	۳۲۰۸۰۰	۸۲۱۷/۹	۰/۸۳۳	۰/۵۳۴
۰/۴۲	۱۳۴	۲۷۲	۲۲۱۴	۲۰۶۳	۲۴۸۲۵۰	۸۲۱۵/۶	۰/۸۳۳	۰/۵۲۴
۰/۴۳	۹۶	۲۵۱	۲۱۴۰	۲۰۶۱	۱۹۹۱۷۰	۸۱۸۷/۷	۰/۸۲۲	۰/۵۳۵
۰/۴۴	۹۶	۲۴۹	۲۰۱۳	۱۹۴۰	۱۵۰۱۱۰	۸۱۷۰/۲	۰/۷۷۸	۰/۵۳۱
۰/۴۵	۹۲	۲۴۸	۱۸۹۳	۱۸۱۶	۱۲۲۷۳۰	۸۱۴۵/۰	۰/۸۳۱	۰/۵۳۱
۰/۴۶	۹۲	۲۴۶	۱۷۸۹	۱۷۴۸	۸۷۳۰۴	۸۱۱۴/۴	۰/۷۹۶	۰/۵۳۱
۰/۴۷	۸۷	۱۶۰	۱۷۵۰	۱۷۱۳	۶۹۲۲۳	۸۰۹۸/۵	۰/۹۴۶	۰/۱۳۷
۰/۴۸	۸۷	۱۶۰	۱۶۵۶	۱۶۵۲	۴۹۱۴۰	۸۰۸۴/۰	۰/۸۹۷	۰/۱۴۰
۰/۴۹	۸۷	۱۵۶	۱۶۵۰	۱۶۲۶	۴۷۰۴۴	۸۰۷۵/۱	۰/۵۵۴	۰/۱۴۰



شکل (۴): اثر ضریب جانشینی تقاضا (β) بر قیمت کانال‌های توزیع

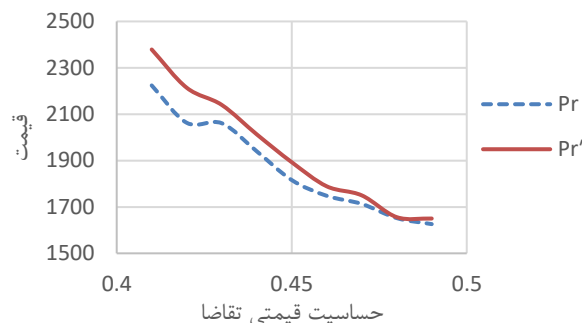


شکل (۸): مرز پارتوی مساله در تحلیل حساسیت کشش قیمتی تقاضا

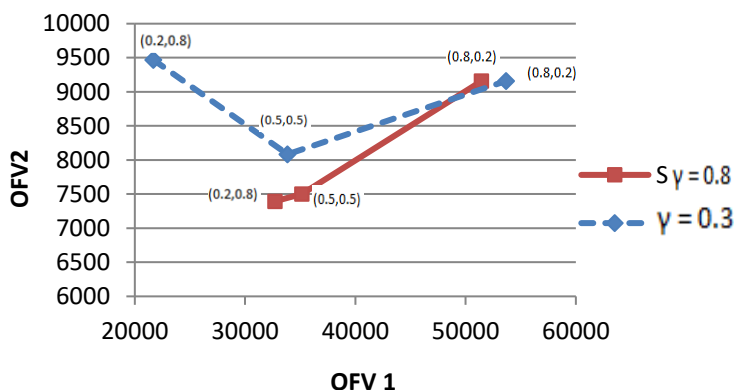
جدول (۸): تحلیل حساسیت مدل بر اساس پارامترهای تابع هدف

تجمعی TH					
مقادیر توابع هدف	درجه رضایت‌مندی توابع هدف	درجه اهمیت توابع هدف	درجه حدافل	درجه امکان	مقادیر توابع هدف
$f_1$	$f_2$	$(\theta_1, \theta_2)$	$\mu_1$	$\mu_2$	$\gamma$
۳۲۷۱۱	۷۳۹۴/۹	(۰/۱، ۰/۲/۸)	۰/۵۷۲	۰/۵۷۹	۰/۸
۳۵۱۶۴	۷۵۰۴	(۰/۵، ۰/۵)	۰/۵۸۷	۰/۵۶۲	۰/۸
۵۱۴۵۰	۹۱۵۸/۱	(۰/۸، ۰/۲)	۰/۸۸۵	۰/۴۶۶	۰/۸
۲۱۶۸۲	۹۴۶۹/۸	(۰/۱، ۰/۲/۸)	۰/۳۷۲	۰/۴۴۸	۰/۳
۳۳۸۶۲	۸۰۸۴/۱	(۰/۵، ۰/۵)	۰/۵۷۴	۰/۵۲۹	۰/۳
۵۳۶۸۰	۹۱۶۰/۱	(۰/۸، ۰/۲)	۰/۹۲۳	۰/۴۶۶	۰/۳

$\theta$  برای هر تابع هدف، درجه رضایت‌مندی تابع هدف مربوطه نیز تغییر می‌کند. از سوی دیگر مقدار بالاتر برای پارامتر  $\gamma$  به معنای توجه بیشتر به حداقل درجه ارضای اهداف ( $\lambda_i$ ) و کسب یک حد پایین بهتر برای ارضای اهداف است که جواب‌های قابل قبول متعادل‌تر ایجاد می‌کند. بنابراین، با کاهش مقدار پارامتر  $\gamma$  از ۰/۸ به ۰/۳ جواب‌های بهینه به دست آمده برای توابع هدف نامتعادل‌تر شده‌اند. بنابراین می‌توان گفت که با کاهش  $\gamma$  به کسب یک حد پایین بهتر برای ارضای اهداف توجه کمتری شده است. مرز پارتوی مسأله آزمایشی باتوجه به تغییر ضرایب تابع TH در شکل (۹) نشان داده شده است. اعداد نشان داده شده روی نقاط مختلف نمودار به ترتیب نشان‌دهنده درجه اهمیت توابع هدف اول و دوم ( $\theta_1, \theta_2$ ) هستند. همان‌طور که مشخص است با تغییر ضرایب تابع تجمعی TH می‌توان جواب‌ها و مقادیر مختلفی را برای اهداف به دست آورد که باتوجه به ارجحیت تصمیم‌گیر می‌توان حالت بهینه پارتو را برای مسأله مشخص کرد.



شکل (۷): اثر حساسیت قیمتی تقاضا (s) بر قیمت کانال‌های توزیع



شکل (۹): مرز پارتوی مساله در تحلیل ضرایب تابع تجمعی TH

هستند، اثبات می‌گردد. با تحلیل حساسیت بر روی پارامترهای رابطه قیمت و تقاضا نشان دادیم که تصمیم‌گیرنده قادر است با تغییر ضرایب حساسیت قیمت-تقاضا و درجه جانشینی تقاضا برای هریک از بازارهای آنلاین و سنتی، بر روی قیمت بهینه کانال‌های توزیع تأثیرگذار باشد. از آنجایی که در شبکه‌های توزیع دوکاناله، قیمت کانال‌های توزیع روی تقاضای مشتریان اثر می‌گذارد، با تعیین قیمت بهینه می‌توان سود کل زنجیره تأمین را افزایش داد.

همچنین نشان داده شد که با تغییر پارامترهای  $\theta_i$  و  $\gamma$  ارزش توابع

### ۶. نتیجه‌گیری

مدل پیشنهادی در دو حالت هزینه‌های برابر برای حمل محصول به هردو بازار، و کمتر بودن هزینه‌های حمل‌ونقل بازار اول نسبت به بازار دوم حل شد. نتایج به دست آمده نشان داد که در صورتی که هزینه‌های حمل‌ونقل هر دو کانال توزیع برابر باشد، حمل‌ونقل در مسیرهایی که در آن‌ها از وسایلی با آلایندگی زیست‌محیطی کمتر استفاده می‌شود بیشتر است. بنابراین کارآمدی مدل در برقراری تعادل بین اهداف اول و دوم مسأله که به ترتیب بیان‌کننده اهداف اقتصادی و زیست‌محیطی

- هدف و درجه رضایت‌مندی هریک از اهداف تغییر می‌کند. بنابراین تصمیم‌گیرنده قادر است با تغییر اندازه پارامتر  $\theta$  اولویت توابع هدف را مشخص کند. از سوی دیگر می‌توان با تنظیم پارامتر  $\gamma$  یک جواب قابل‌قبول متعادل یا غیرمتعادل برای یک مسأله براساس ترجیحات تصمیم‌گیر به‌دست آورد.
- در راستای بهبود مدل طی تحقیقات آتی می‌توان اننتخاب انواع دیگری از رویکردهای چندکاناله برای فروش از جمله Omni-Channel را در طراحی زنجیره‌تأمین سبز مورد بررسی قرار داد. در نظر گرفتن کمبود مجاز در حالت پس‌افت نیز به‌عنوان یک رویکرد برای تحقیقات آتی مطرح می‌شود. همچنین پیشنهاد می‌شود از روش‌های ابتکاری و فراابتکاری برای حل مدل در ابعاد بزرگ استفاده شود.
- ### مراجع
- [1] EPA, "Fast facts: U.S. transportation sector GHG emissions 1990-2019," 2021.
- [2] N. Group, "Who's buying direct and why: consumers tell all," 2004.
- [3] F. Xiao, Z. H. Hu, K. X. Wang, and P. H. Fu, "Spatial distribution of energy consumption and carbon emission of regional logistics," *Sustain.*, vol. 7, no. 7, pp. 9140–9159, 2015.
- [4] F. Barzinpour and P. Taki, "A dual-channel network design model in a green supply chain considering pricing and transportation mode choice," *J. Intell. Manuf.*, vol. 29, no. 7, pp. 1465–1483, Oct. 2018.
- [5] T. Xiao, T. M. Choi, and T. C. E. Cheng, "Product variety and channel structure strategy for a retailer-Stackelberg supply chain," *Eur. J. Oper. Res.*, vol. 233, no. 1, pp. 114–124, Feb. 2014.
- [6] M. S. Pishvae and J. Razmi, "Environmental supply chain network design using multi-objective fuzzy mathematical programming," *Appl. Math. Model.*, vol. 36, no. 8, pp. 3433–3446, Aug. 2012.
- [7] M. Ramezani, M. Bashiri, and R. Tavakkoli-Moghaddam, "A new multi-objective stochastic model for a forward/reverse logistic network design with responsiveness and quality level," *Appl. Math. Model.*, vol. 37, no. 1–2, pp. 328–344, Jan. 2013.
- [8] بشیری، مهدی و شرافتی، مهتاب، "طراحی دوهدفه شبکه زنجیره‌تأمین حلقه بسته با در نظر گرفتن معیارهای همبسته در محیط فازی." نشریه پژوهش‌های مهندسی صنایع در سیستم‌های تولید، سال اول، شماره اول: ۲۵–۳۶، ۱۳۹۲.
- [9] قهرمانی‌نهر، جاوید، قدرت‌نما، علی، ایزدبخش، حمیدرضا، توکلی مقدم، رضا، "طراحی یک شبکه زنجیره‌تأمین سبز چندهدفه چند محصولی و چند دورهای با در نظر گرفتن تخفیف در شرایط عدم قطعیت." نشریه پژوهش‌های مهندسی صنایع در سیستم‌های تولید، سال ششم، شماره سیزدهم: ۱۱۹–۱۳۷، ۱۳۹۷.
- [10] S. M. J. Mirzapour Al-E-Hashem, A. Baboli, and Z. Sazvar, "A stochastic aggregate production planning model in a green supply chain: Considering flexible lead times, nonlinear purchase and shortage cost functions," *Eur. J. Oper. Res.*, vol. 230, no. 1, pp. 26–41, Oct. 2013.
- [11] Z. Sazvar, S. M. J. Mirzapour Al-E-Hashem, A. Baboli, and M. R. Akbari Jokar, "A bi-objective stochastic programming model for a centralized green supply chain with deteriorating products," *Int. J. Prod. Econ.*, vol. 150, pp. 140–154, Apr. 2014.
- [12] Y. C. Tsao, E. Nugraha Ridhwan Amir, V. Van Thanh, and M. Dachyar, "Designing an eco-efficient supply chain network considering carbon trade and trade-credit: A robust fuzzy optimization approach," *Comput. Ind. Eng.*, vol. 160, p. 107595, Oct. 2021.
- [13] J. Wang and Q. Wan, "A multi-period multi-product green supply network design problem with price and greenness dependent demands under uncertainty," *Appl. Soft Comput.*, vol. 114, p. 108078, Jan. 2022.
- [14] A. Roy, S. S. Sana, and K. Chaudhuri, "Joint decision on EOQ and pricing strategy of a dual channel of mixed retail and e-tail comprising of single manufacturer and retailer under stochastic demand," *Comput. Ind. Eng.*, vol. 102, pp. 423–434, Dec. 2016.
- [15] H. Xu, Z. Z. Liu, and S. H. Zhang, "A strategic analysis of dual-channel supply chain design with price and delivery lead time considerations," *Int. J. Prod. Econ.*, vol. 139, no. 2, pp. 654–663, Oct. 2012.
- [16] Q. Ding, C. Dong, and Z. Pan, "A hierarchical pricing decision process on a dual-channel problem with one manufacturer and one retailer," *Int. J. Prod. Econ.*, vol. 175, pp. 197–212, May 2016.
- [17] S. S. Gan, I. N. Pujawan, Suparno, and B. Widodo, "Pricing decision for new and remanufactured product in a closed-loop supply chain with separate sales-channel," *Int. J. Prod. Econ.*, vol. 190, pp. 120–132, Aug. 2017.
- [18] M. B. Jamali and M. Rasti-Barzoki, "A game theoretic approach for green and non-green product pricing in chain-to-chain competitive sustainable and regular dual-channel supply chains," *J. Clean. Prod.*, vol. 170, pp. 1029–1043, Jan. 2018.
- [19] N. M. Modak and P. Kelle, "Managing a dual-channel supply chain under price and delivery-time dependent stochastic demand," *Eur. J. Oper. Res.*, vol. 272, no. 1, pp. 147–161, Jan. 2019.
- [20] H. Zhang and K. Yang, "Multi-Objective Optimization for Green Dual-Channel Supply Chain Network Design Considering Transportation Mode Selection," *Supply Chain Logist. Manag.*, pp. 382–404, Oct. 2019.
- [21] A. Vafaei, S. Yaghoubi, J. Tajik, and F. Barzinpour, "Designing a sustainable multi-channel supply chain distribution network: A case study," *J. Clean. Prod.*, vol. 251, p. 119628, Apr. 2020.
- [22] Q. Lu and N. Liu, "Pricing games of mixed conventional and e-commerce distribution channels," *Comput. Ind. Eng.*, vol. 64, no. 1, pp. 122–132, Jan. 2013.
- [23] B. Liu, R. Zhang, and M. Xiao, "Joint decision on production and pricing for online dual channel supply chain system," *Appl. Math. Model.*, vol. 34, no. 12, pp. 4208–4218, Dec. 2010.
- [24] B. Dan, G. Xu, and C. Liu, "Pricing policies in a dual-channel supply chain with retail services," *International Journal of Production Economics*, 139(1), pp. 312–320. doi: 10.1016/J.IJPE.2012.05.014. 2012.
- [25] M. S. Pishvae and S. A. Torabi, "A possibilistic programming approach for closed-loop supply chain network design under uncertainty," *Fuzzy Sets Syst.*, vol. 161, no. 20, pp. 2668–2683, Oct. 2010.
- [26] M. Jiménez, M. Arenas, A. Bilbao, and M. V. Rodríguez, "Linear programming with fuzzy parameters: An interactive method resolution," *Eur. J. Oper. Res.*, vol. 177, no. 3, pp. 1599–1609, Mar. 2007.
- [27] M. A. Parra, A. B. Terol, B. P. Gladish, and M. V. R. Uría, "Solving a multiobjective possibilistic problem through compromise programming," *Eur. J. Oper. Res.*, vol. 164, no. 3, pp. 748–759, Aug. 2005.
- [28] S. A. Torabi and E. Hassini, "An interactive possibilistic programming approach for multiple objective supply chain master planning," *Fuzzy Sets Syst.*, vol. 159, no. 2,

closed-loop supply chain network under uncertainty," <http://dx.doi.org/10.1080/00207721.2012.720296>, vol. 45, no. 3, pp. 283–299, Mar. 2013.

pp. 193–214, Jan. 2008.

[29] A. lireza Fallah-Tafti, R. Sahraeian, R. Tavakkoli-Moghaddam, and M. Moeinipour, "An interactive possibilistic programming approach for a multi-objective



DOI: 10.22084/IER.2021.25118.2055

## A Fuzzy Multi-Objective Model for Designing a Dual-Channel Green Supply Chain Considering Pricing Under Uncertainty

M. Rezakhanlou<sup>1</sup>, H. Amoozad Khalili<sup>2\*</sup>, S. M. J. Mirzapour Al-e-Hashem<sup>3</sup>

1. Master of Science, Department of Industrial Engineering and Management Systems, Amirkabir University of Technology (Tehran Polytechnic), Iran

2. Assistant Professor, Department of Industrial Engineering, Nowshahr Branch, Islamic Azad University, Nowshahr, Iran

3. Assistant Professor, Department of Industrial Engineering and Management Systems, Amirkabir University of Technology, (Tehran Polytechnic), Iran

### ARTICLE INFO

#### *Article history:*

Received 25 April 2021

Accepted 25 June 2021

#### *Keywords:*

Green supply chain  
Dual-channel supply chain pricing  
Possibilistic programming  
Fuzzy multi-objective optimization

### ABSTRACT

Incentive by the recent global trend in greenhouse gases (GHG) emission reduction strategies and considering the evolution of business models from traditional to multi-channel, in this research, we analyze a dual-channel green supply chain in which a manufacturer delivers a product through one direct channel and one retail channel whose demand are uncertain and prices in channels can effect on customer demand. Modeling this chain is carried out by accounting for the optimal price of distribution channels, total profit optimization, and reduction of transportation cost, we well as minimizing CO<sub>2</sub> emission that the CO<sub>2</sub> emission is investigated through transportation mode choice. The proposed model has developed first a mixed-integer nonlinear programming and a theoretical technique is applied to linearizing the problem. To solve the proposed multi-objective Possibilistic programming model, the Jimenez and TH approach has been used. The model is verified by numerical experiments and then several sensitivity analyses have performed. Computational results proved the efficiency of the model in finding a trade-off between economic and environmental objectives so that if transportation costs are equal to both markets, in order to balance the goals, the model uses vehicles that have a less environmental impact. In addition, the proposed solution method enables the decision maker to determine the importance of each objective function. The decision-maker is also able to influence the optimal price of distribution channels by changing the parameters in the demand-price equation and maximize the total profit of the supply chain.

\* Corresponding author: H. Amoozad Khalili  
Tel.: 021-64545350; E-mail address: Amoozad92@yahoo.com