

یک مدل چند هدفه استوار برای طراحی شبکه زنجیره تأمین با در نظر گیری جریان رو به جلو و عقب و مسئولیت پذیری اجتماعی

حمید صفاری^۱، احمد ماکویی^{۲*}، میرسامان پیشوایی^۳ و وحید محمودیان^۴

اطلاعات مقاله	چکیده
دریافت مقاله: ۱۳۹۳/۰۴/۱۸	
پذیرش مقاله: ۱۳۹۴/۰۲/۲۳	
واژگان کلیدی:	
زنجیره تأمین حلقه بسته ،	در این مقاله مدلی چند هدفه ارائه شده است که در آن همزمان جریان رو به جلو و عقب در زنجیره تأمین در نظر گرفته شده و اهداف شامل هزینه و تأثیرات محیطی مانند میزان کربن دی اکسید و میزان مصرف آب و همچنین تأثیرات اجتماعی مانند میزان مشاغل ایجاد شده و عدالت در ایجاد مشاغل در نقاط مختلف می باشد. به علاوه در این تحقیق میزان تقاضا به صورت غیر قطعی بوده و با استفاده از روش برنامه ریزی استوار این عدم قطعیت وارد مدل سازی شده است. همچنین در مدل مورد نظر علاوه بر تعیین مکان بهینه تسهیلات و جریان بین آنها انتخاب نوع تکنولوژی و ظرفیت برای هر کارخانه تولیدی انجام می گیرد. در نهایت از صنعت فولاد برای پیاده سازی مدل ارائه شده استفاده شده است و نتایج نشان دهنده کارایی مدل استوار نسبت به مدل قطعی می باشد.
لجستیک معکوس ،	
مسئولیت پذیری اجتماعی ،	
برنامه ریزی استوار ،	

۱- مقدمه

تعیین شده منجر به هزینه های زیادی می شود، این مساله به موضوعی حساس در زنجیره تأمین تبدیل شده است. از طرفی طی دهه های گذشته توجه روز افزونی به لجستیک معکوس و زنجیره تأمین حلقه بسته شده و این امر تا حد زیادی به دلیل درک اهمیت روز افزون محصولات و فناوری ایجاد شده در محل پایان زنجیره های تأمین یک طرفه عمومی و تأثیر قوانین سبز به ویژه در اروپاست. در سالهای اخیر سازمان های واقع در گوشه و کنار دنیا، سهام داران و ذینفعان آنها، آگاهی و شناخت فزاینده ای نسبت به مسئولیت اجتماعی پیدا کرده اند. ایزو ۲۶۰۰۰ راهکاری را در زمینه اصول اساسی مسئولیت اجتماعی، مسائل و موضوعات مرتبط با روش های ادغام و تلفیق رفتار مسئولیت اجتماعی با راهکارها، سیستم ها، اقدامات و فرآیندهای سازمانی فعلی، ارائه می نماید [۱]. در واقع این استاندارد برای کمک به سازمان ها برای توسعه پایدار،

زنجیره تأمین شامل تعدادی تسهیل است که وظیفه آنها دریافت مواد خام از تأمین کننده ها، تولید محصول و توزیع در میان مشتریان است. مساله طراحی شبکه زنجیره تأمین شامل تصمیمات استراتژیک برای تعیین پیکره کلی زنجیره تأمین است. در این نوع مسائل عمدتاً به مکان یابی بهینه تسهیلات مختلف و جریان بین آنها توجه می شود. از آنجایی که مکان تعیین شده برای مدت طولانی مورد استفاده قرار می گیرد و تغییر مکان تسهیل

۱. دانشجوی کارشناسی ارشد، مهندسی صنایع، دانشگاه علم و صنعت
Hamidsaffari87@yahoo.com
۲. دانشیار، دانشکده مهندسی صنایع، دانشگاه علم و صنعت
* پست الکترونیک نویسنده مسئول: amakui@iust.ac.ir
۳. استادیار، دانشکده مهندسی صنایع، دانشگاه علم و صنعت
۴. دانشجوی کارشناسی ارشد، مهندسی صنایع، دانشگاه علم و صنعت

تقاضا و مقدار بازگشت میزان هزینه‌های حمل و نقل و کیفیت محصولات بازگشتی نیز به صورت غیرقطعی در نظر گرفته شده‌اند. السید و همکاران [۸] به توسعه مدل‌های ارائه شده به صورت چند دوره‌ای و چند سطحی با در نظر گرفتن جریان رو به جلو و عقب و همین‌طور ریسک پرداختند. پیشوایی و همکاران [۹] در ادامه مدل تک هدفه ارائه شده یک مدل برنامه‌ریزی عدد صحیح مختلط دو هدفه برای طراحی شبکه زنجیره تأمین ارائه دادند که در تابع هدف اول هزینه‌های ثابت برقراری تسهیلات و هزینه‌های متغیر حمل و نقل و در تابع هدف دوم، زمان تحویل به مشتری کمینه می‌شد. آنها برای حل این مدل از یک رویکرد فازی تکراری استفاده کرده‌اند.

در حوزه برنامه‌ریزی استوار هم پژوهش‌های اندکی در این زمینه وجود دارد، از جمله پیشوایی و همکاران [۱۰] در سال ۲۰۱۱ مدلی تک محصولی و تک دوره‌ای با تقاضا، مقدار بازگشت محصولات و هزینه‌های انتقال بین تسهیلات غیر قطعی ارائه دادند. در این مدل برای اولین بار از برنامه‌ریزی استوار برای مدل‌سازی زنجیره تأمین رو به جلو و عقب استفاده شده است. وحدانی و همکاران [۱۱] نیز از برنامه‌ریزی استوار برای طراحی شبکه حلقه بسته با در نظر گرفتن قابلیت اطمینان استفاده کردند. در این مدل هر یک از مراکز جمع‌آوری با یک احتمال دچار شکست می‌شوند. برای این منظور یک مدل دو هدفه توسعه داده شده است که هزینه‌های شبکه و هزینه‌های حمل و نقل بعد از خرابی تسهیلات را کمینه می‌کند. بعدها حسنی و همکاران [۱۲] مدلی استوار برای تصمیمات استراتژیک طراحی شبکه زنجیره تأمین تحت شرایط عدم قطعیت ارائه کردند که در آن BOM^1 محصولات تولیدی از طریق محصولات بازگشتی، در نظر گرفته شده است.

رضانی و همکاران [۱۳] در سال ۲۰۱۳ در جهت تکمیل مدل‌های چند هدفه ارائه شده در این زمینه مدلی چند هدفه سناریو محور برای طراحی شبکه زنجیره رو به جلو و

طراحی شده است. یکی از مهمترین مسائل قرن فعلی که مورد توجه دانشمندان قرار گرفته است، گرم شدن زمین در اثر گازهای گلخانه‌ای است. این مساله جهان را در آستانه فاجعه بزرگ انسانی و زیست محیطی قرار داده است. علت اصلی آن افزایش گاز کربن‌دی‌اکسید ناشی از سوخت‌های فسیلی می‌باشد. مقدار کل آب شیرین در دسترس نیز به دلایل تغییرات آب و هوایی ناشی از گرم شدن کره زمین و عقب نشینی یخچال‌های طبیعی و کم آب شدن رودخانه‌ها کاهش یافته است [۲].

در ادبیات زنجیره تأمین مدل‌سازی زنجیره رو به جلو و عقب به صورت هم‌زمان تقریباً از سال ۲۰۰۰ به بعد مورد توجه واقع شد. به طوری که در سال ۲۰۰۱ یک مدل پایه‌ای جایابی تسهیلات توسط فلیشمن و همکاران [۳] ارائه شده است. در این مقاله به بررسی تأثیرات جریان بازگشت کالا بر طراحی شبکه زنجیره تأمین پرداخته شده است. مدل ارائه شده یکی از اولین مدل‌ها در این زمینه محسوب می‌شود که در آن هم‌زمان به جریان رو به جلو و عقب توجه شده است. در ادامه بامون و فرناندز [۴] در سال ۲۰۰۴ مدلی چند دوره‌ای ارائه کردند. آنها در مدل خود، نرخ بهره را نیز در نظر گرفتند و با کمک آن هزینه‌های عملیاتی در دوره‌های مختلف را تبدیل به هزینه‌ها در سال پایه کردند. کو و اوانس [۵] در سال ۲۰۰۷ یک مدل برنامه‌ریزی غیر خطی عدد صحیح مختلط برای شبکه‌های توزیع یکپارچه پویا با در نظر گرفتن جریان رو به جلو و عقب برای شرکت‌های لجستیک طرف سوم ارائه دادند.

سالما و همکاران [۶] در ادامه کارهای فلیشمن مدلی چند محصولی و دارای محدودیت ظرفیت را برای طراحی شبکه لجستیک در شرایط عدم قطعیت معرفی کردند که این عدم قطعیت در تقاضا و نرخ برگشت بوده و برای بررسی تأثیر آن از سناریوهای مختلف بهره گرفته شده است. در جهت تکمیل تحقیق سالما، پیشوایی و همکاران [۷] یک مدل بهینه‌سازی تصادفی برای طراحی شبکه‌ی زنجیره‌ی رو به جلو و عقب ارائه کردند که در این پژوهش علاوه

¹Bill of material

انجام شده مدل ریاضی ارائه نشده است. کروز و واکلبینگر [۱۹] و کروز [۲۰] چارچوبی تئوری را برای مدل‌سازی و تحلیل شبکه زنجیره تأمین با استفاده از تصمیم‌گیری چند معیاره ارائه دادند و نتایج حاصل نشان داد که سرمایه‌گذاری در معیارهای اجتماعی موجب افزایش سودآوری و کاهش ریسک می‌شود. دهقانیان و منصور [۲۱] در سال ۲۰۰۹ با صرف نظر از جریان رو به جلو به طراحی شبکه بازیافت تیرهای فرسوده پرداختند و در آن سه تابع هدف هزینه، میزان آلودگی محیط زیست و معیارهای اجتماعی مانند ایجاد شغل، توسعه محلی و ریسک مربوط به محصولات و شرایط خطرناک کاری را در نظر گرفتند. آنها از الگوریتم ژنتیک چند هدفه برای حل مدل خود استفاده کردند. پیشوایی و همکاران [۲۲] در سال ۲۰۱۲ مدلی را برای زنجیره تأمین یک طرفه رو به جلو ارائه کردند و در آن پاره‌ای از معیارهای اجتماعی مانند نرخ استخدام، موقعیت شغلی ایجاد شده، مقدار هدر رفت مواد و میزان تولید محصولات خطر آفرین برای مشتریان را در نظر گرفتند.

بررسی تحقیقات انجام شده در این زمینه نشان می‌دهد که در نظر گرفتن هم‌زمان توابع هزینه، تأثیرات اجتماعی و تأثیرات محیطی و تحت شرایط عدم قطعیت در ادبیات موجود کمتر مورد توجه قرار گرفته است. عدم قطعیت در اکثر مقالات به صورت سناریوسازی و میانگین‌گیری وارد شده است که یک راهکار مناسب و کافی برای مقابله با عدم قطعیت نمی‌باشد. از طرفی مقالاتی که وجود تکنولوژی‌های مختلف و امکان انتخاب از بین آنها و همین‌طور میزان ظرفیت متفاوت برای تسهیلات را در نظر گرفته‌اند بسیار معدود است. در همه مقالاتی که به بحث تأثیرات محیطی پرداخته‌اند، تنها گاز کربن‌دی‌اکسید را ملاک فاکتور محیطی در نظر گرفته‌اند و سایر عوامل مانند میزان مصرف آب نادیده گرفته شده است؛ همچنین عواملی اجتماعی مانند عدالت در ایجاد مشاغل در ادبیات وجود ندارد.

عقب ارائه کردند. در تابع هدف اول، مقدار سود و در تابع هدف دوم سطح خدمت دهی در لجستیک رو به جلو و عقب بهینه می‌شود. تابع هدف سوم هم‌میزان کیفیت را در نظر می‌گیرد و مقدار مواد نامرغوب ارسال شده از تأمین‌کننده را کمینه می‌کند.

فاکیو و همکاران [۱۴] در سال ۲۰۱۳ یک مدل برنامه‌ریزی خطی ارائه کردند و در آن عوامل پایداری با در نظر گرفتن جمع‌آوری محصولات مختلف، استفاده از قطعات مناسب و اسقاط بقیه قطعات که قابل استفاده نیستند را وارد مدل‌سازی کردند.

از جمله پژوهش‌هایی که به تأثیرات محیط‌زیست در طراحی شبکه زنجیره تأمین توجه داشته‌اند می‌توان به تحقیق امین و ژنگ [۱۵] اشاره کرد که مدلی چند محصولی و دو هدفه شامل هزینه و تأثیرات محیطی برای زنجیره تأمین حلقه بسته ارائه کردند. در تابع هدف دوم استفاده از مواد سازگار با محیط زیست برای ساخت محصولات در کارخانه و استفاده از انرژی‌های تمیز مانند انرژی‌های تجدیدپذیر و یا انرژی خورشیدی در مراکز جمع‌آوری در نظر گرفته شده است. در همان سال پیشوایی و رزمی [۱۶] یک مدل فازی با دو هدف تأثیرات محیطی و هزینه ارائه کردند. وانگ و همکاران [۱۷] در سال ۲۰۱۳ مدلی چند هدفه که شامل هزینه، میزان گاز کربن‌دی‌اکسید خروجی و میزان اتلاف تولید بود، برای پیدا کردن مکان بهینه تسهیلات، مانند کارخانه‌های تولید محصولات جدید و تولید مجدد محصولات، مراکز توزیع و بازیافت و جریان بین آنها ارائه دادند. در مدل مورد نظر پارامترهای استفاده شده به صورت قطعی بودند.

در مورد تأثیرات اجتماعی طراحی شبکه زنجیره تأمین، پژوهش‌های اندکی انجام گرفته که از جمله می‌توان به موارد زیر اشاره کرد.

کارتند و جنینگر [۱۸] در سال ۲۰۰۲ به بررسی تأثیرات اجتماعی خرید بر عملکرد زنجیره تأمین پرداختند و نشان دادند که خرید بر اساس معیارهای اجتماعی تأثیر مستقیم و مثبتی بر عملکرد تأمین‌کننده‌ها دارد. ولی در تحقیق

داده‌های ورودی دارند. در این مقاله رویکرد ارائه شده اینگونه توصیف شده است.

$$\text{Min } z = (C^T x + d^T y) \quad (1)$$

S.t.

$$Ax = b \quad (2)$$

$$Bx + Cy = e \quad (3)$$

$$x, y \geq 0 \quad (4)$$

در این مدل کلی معادله ۲ نشان‌دهنده پارامترهای قطعی و معادله ۳ نشان‌دهنده پارامترهای تصادفی می‌باشد. x بردار متغیرهای تصمیم‌گیری، b و c ماتریس ضرایب فنی و e بردار سمت راست را نشان می‌دهند.

Ω نشان‌دهنده سناریوهای مورد نظر می‌باشد و به صورت $\Omega = \{1, 2, \dots, S\}$ تعریف می‌شود. پارامترهای غیرقطعی B, C, e می‌توانند به صورت B_s, C_s, e_s برای هر سناریو $s \in \Omega$ نشان داده شوند. همچنین احتمال وقوع هر سناریو را با p_s نشان داده و بنابراین مجموع احتمالات سناریوهای مختلف نیز باید برابر با ۱ شود ($\sum_s p_s = 1$). مجموعه $\{y_1, y_2, \dots, y_S\}$ به عنوان متغیرهای کنترلی و مجموعه $\{z_1, z_2, \dots, z_S\}$ پارامترهای خطا هستند که میزان نشدنی بودن را در محدودیت‌های نشدنی نشان می‌دهند. بنابراین مدل ارائه شده در مقاله مولوی به صورت زیر تبدیل می‌شود.

$$\text{Min } z = \sigma(y_1, y_2, \dots, y_S) + \omega \rho(z_1, z_2, \dots, z_S) \quad (5)$$

S.t.

$$Ax = b \quad (6)$$

$$B_s x + C_s y_s + z_s = e_s \quad \text{for all } s \in \Omega \quad (7)$$

$$x, y_s, z_s \geq 0 \quad \text{for all } s \in \Omega \quad (8)$$

مقدار ω نیز میزان جریمه نشدنی بودن به ازای یک محدودیت می‌باشد. اگر تابع هدف مورد نظر را با Γ که تابع از x, y است و به صورت $f(x, y)$ نشان داده شود آنگاه مقدار این تابع تحت هر سناریوی مختلف را می‌توان به صورت $\Gamma_s = f(x, y_s)$ نوشت. هر چقدر مقدار واریانس برای $\Gamma_s = f(x, y_s)$ بیشتر باشد، میزان ریسک بیشتر می‌شود. مولوی و همکاران [۲۳] این مقدار

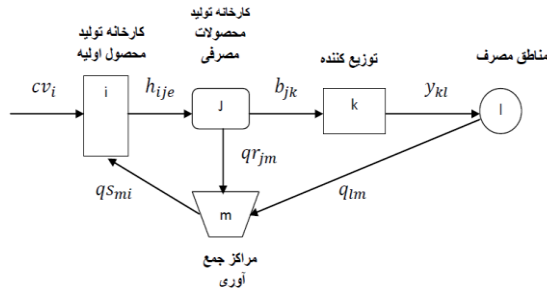
در این تحقیق مدلی چند هدفه ارائه شده که در آن همزمان جریان رو به جلو و عقب در زنجیره تأمین در نظر گرفته شده است و اهداف شامل هزینه و تأثیرات محیطی مانند میزان کربن دی اکسید و میزان مصرف آب و همچنین تأثیرات اجتماعی مانند میزان مشاغل ایجاد شده و عدالت در ایجاد مشاغل در نقاط مختلف می‌باشد. به علاوه در این تحقیق میزان تقاضا به صورت غیر قطعی بوده و با استفاده از روش برنامه‌ریزی استوار این عدم قطعیت وارد مشاغل ایجاد شده و عدالت در ایجاد مشاغل در نقاط مختلف (به این معنی که با راه‌اندازی کارخانه‌ها با ظرفیت کمتر، تعداد کارخانه‌ها و توزیع جغرافیایی آن‌ها افزایش پیدا کرده و بنابراین عدالت در ایجاد مشاغل بیشتر می‌شود) در نظر گرفته شده است. به علاوه، در این تحقیق میزان تقاضا به صورت غیر قطعی بوده و با استفاده از روش برنامه‌ریزی استوار این عدم قطعیت وارد مدل‌سازی شده است. همچنین، علاوه بر تعیین مکان بهینه تسهیلات و جریان بین آنها انتخاب نوع تکنولوژی و ظرفیت برای هر کارخانه تولیدی نیز صورت می‌گیرد. در نهایت از صنعت فولاد برای پیاده‌سازی و ارزیابی مدل ارائه شده استفاده شده است. برای حل مدل ارائه شده نیز از یک روش فازی که مقدار توابع هدف را تبدیل به میزان مطلوبیت می‌کند استفاده شده است.

ادامه مقاله به این شرح تنظیم شده است؛ در بخش بعدی رویکرد بهینه‌سازی استوار مولوی [۲۳] توضیح داده شده است. در بخش ۳ مدل‌سازی مساله مورد نظر گرفته و در بخش ۴ روش حل و نتایج ناشی از حل مدل آورده شده است. در نهایت بخش ۵ شامل تحلیل نتایج و نتیجه‌گیری می‌باشد.

۲- رویکرد بهینه‌سازی استوار مولوی

مولوی و همکاران [۲۳] یک مدل عمومی برای بهینه‌سازی استوار ارائه کردند. در این روش جواب‌هایی که از حل مدل بدست می‌آیند حساسیت کمتری به تغییر در

مراکز جمع‌آوری هدایت می‌شوند. البته جریان دیگری از ضایعات نیز به مراکز جمع‌آوری وارد می‌شود و آن ضایعات تولیدی در کارخانه‌های تولید محصولات می‌باشد و چرخه به همین صورت ادامه می‌یابد. شکل ۱ شبکه مورد مطالعه را نشان می‌دهد.



شکل ۱ - شبکه زنجیره رو به جلو و عقب مورد مطالعه

۳-۱- مفروضات

- کارخانجات تولید محصول اولیه دارای ظرفیت‌های گوناگون بوده و در آنها امکان استفاده از تکنولوژی‌های مختلف وجود دارد.
- مقدار مواد اولیه به صورت نامحدود وجود دارد.
- کیفیت محصولات مختلف جمع‌آوری شده از نقاط مصرف گوناگون، همگی یکسان است.
- تنها یک محصول در شبکه جریان دارد و مدل مورد نظر برای یک دوره در نظر گرفته شده است.
- مکان کارخانه‌های تولید محصولات و مشتریان از قبل مشخص است.
- تقاضا به صورت غیر قطعی است و توسط سناریوهای مختلف به مدل داده می‌شود.
- ظرفیت هرتسهیل محدود بوده و از قبل مشخص است.
- جریان محصولات فقط بین دو سطح متوالی از زنجیره امکان پذیر است.
- در کارخانه‌های تولید محصول اولیه فقط یک نوع محصول تولید می‌شود.

را به صورت زیر نشان دادند که در آن λ نشان دهنده وزن مربوط به قسمت پایداری مدل می‌باشد.

$$\sigma(\cdot) = \sum_{s \in \Omega} p_s \Gamma_s + \lambda \sum_{s \in \Omega} p_s (\Gamma_s - \sum_{s \in \Omega} p_s \Gamma_s) \quad (9)$$

یو و لی [۲۴] روشی دیگر را برای در نظر گرفتن انحراف از جوابها در نظر گرفتند و دلیل این پیچیدگی برنامه‌ریزی درجه دوم می‌باشد که به صورت زیر نشان داده می‌شود.

$$\sigma(\cdot) = \sum_{s \in \Omega} p_s \Gamma_s + \lambda \sum_{s \in \Omega} p_s |\Gamma_s - \sum_{s \in \Omega} p_s \Gamma_s| \quad (10)$$

از آنجایی که تابع هدف ارائه شده به صورت غیرخطی می‌باشد به کمک قضیه ارائه شده در مقاله یو و لی [۲۴] به صورت خطی تبدیل می‌شود.

$$\text{Min } \sigma(\cdot) = \sum_{s \in \Omega} p_s \Gamma_s + \lambda \sum_{s \in \Omega} p_s [(\Gamma_s - \sum_{s \in \Omega} p_s \Gamma_s) + \theta_s] \quad (11)$$

$$\Gamma_s - \sum_{s \in \Omega} p_s \Gamma_s + \theta_s \geq 0 \quad \text{for all } s \quad (12)$$

$\sum_{s \in \Omega} p_s \delta_s$ میزان جریمه تابع هدف (۱۱) زمانی که مدل به ازای بعضی از سناریو ها نشدنی شود، می باشد λ و ω هم وزن هایی می باشند که توسط تصمیم گیرنده محاسبه می‌گردند. در نهایت تابع هدف به صورت زیر خلاصه می‌شود.

$$\text{Min } \sigma(\cdot) = \sum_{s \in \Omega} p_s \Gamma_s + \lambda \sum_{s \in \Omega} p_s [(\Gamma_s - \sum_{s \in \Omega} p_s \Gamma_s) + \theta_s] + \omega \sum_{s \in \Omega} p_s \delta_s \quad (13)$$

۳- مدل سازی مساله

شبکه مورد مطالعه دارای دو قسمت یعنی لجستیک رو به جلو و عقب می‌باشد. در جهت رو به جلو زنجیره در کارخانه‌های تولید مواد اولیه با توجه به محصولات جمع‌آوری شده و مواد جدید خریداری شده، تولید مواد اولیه انجام می‌گیرد. سپس این مواد اولیه به کارخانه‌های دیگر منتقل می‌شود و محصول نهایی تولید شده در نهایت توسط توزیع کنندگان در اختیار نقاط مصرف قرار می‌گیرد سپس محصولات استفاده شده پس از مصرف به

CY_j : ظرفیت کارخانه تولید محصولات مصرفی j
 kc_k : هزینه عملیاتی هر واحد محصول در توزیع کننده k
 mc_m : هزینه عملیاتی هر واحد محصول در مرکز جمع
 آوری m

μ : هزینه حمل هر واحد محصول به ازای هر کیلومتر
 en_e : تأثیرات محیطی تولید هر واحد در کارخانه تولید
 مواد اولیه با استفاده از تکنولوژی e
 ρ : تأثیرات محیطی حمل هر واحد محصول به ازای هر
 کیلومتر

wc_e : میزان مصرف آب به ازای تولید هر واحد محصول
 در کارخانه تولید مواد اولیه با استفاده از تکنولوژی e
 β : تعداد کارخانه‌های احداث شده

r_j : نرخ تولید در کارخانجات تولید محصولات مصرفی j
 d_l : مقدار تقاضا در نقاط مصرف l

f_l : نرخ برگشت محصولات در نقاط مصرف l
 jo_i^{ec} : تعداد فرصت شغلی ایجاد شده اگر کارخانه در
 مکان i و با تکنولوژی e و با ظرفیت c احداث شود.

jd_k : تعداد فرصت شغلی ایجاد شده اگر در مکان k
 توزیع کننده احداث شود.

jm_m : تعداد فرصت شغلی ایجاد شده اگر در مکان m
 مراکز جمع‌آوری احداث شود.
 متغیرهای تصمیم

x_i^{ec} : اگر کارخانه تولید مواد اولیه در مکان i با تکنولوژی
 e و ظرفیت c احداث شود ۱ و در غیر این صورت ۰

z_k : اگر در مکان k توزیع کننده احداث شود ۱ و در غیر
 این صورت ۰

w_m : اگر در مکان m مرکز جمع‌آوری تاسیس شود ۱ و
 در غیر این صورت ۰

cv_i : مقدار مواد خام ورودی به کارخانه تولید مواد اولیه i
 h_{ije} : مقدار محصول ارسالی از تولید کننده محصول اولیه

i با سطح تکنولوژی e به کارخانه تولید محصولات مصرفی
 j

b_{jk} : مقدار محصول ارسالی از کارخانه تولید محصولات
 مصرفی j به توزیع کننده k

• درصد بازگشت میزان محصولات بازگشتی و
 همچنین درصد ضایعات تولیدی در کارخانه‌های
 تولید محصول مصرفی مشخص می‌باشد.

• محدودیتی در ظرفیت جریان مواد در طول شبکه
 در نظر گرفته نشده است.

• برای در نظر گرفتن میزان کربن‌دی‌اکسید و مشاغل
 ایجاد شده فرض شده است که هدف کمینه کردن
 کل گازهای تولیدی و بیشینه کردن کل مشاغل
 ایجاد شده در یک محدوده جغرافیایی می‌باشد.

۳-۲- نماد گذاری

اندیس‌ها

i : تعداد نقاط بالقوه کارخانه تولید مواد اولیه

j : مکان‌های ثابت کارخانه‌های تبدیل‌کننده مواد خام به
 محصولات مصرفی

k : مکان‌های بالقوه توزیع کننده

l : مکان‌های ثابت نقاط مصرف

m : مکان‌های بالقوه مراکز جمع‌آوری

پارامترها

FX_i^{ce} : هزینه ثابت احداث کارخانه تولید محصول اولیه i
 با تکنولوژی e و با ظرفیت c

g_k : هزینه ثابت احداث مرکز توزیع k

o_m : هزینه ثابت احداث مرکز جمع‌آوری m

CX_i^c : ظرفیت کارخانه تولید مواد اولیه i با سطح
 ظرفیت c

CY_j : ظرفیت کارخانه تولید محصولات مصرفی j

CZ_k : ظرفیت مرکز توزیع k

CW_m : ظرفیت مرکز جمع‌آوری m

v_{ab} : فاصله بین دو تسهیل a و b

pc_i^{ec} : هزینه تولید هر واحد محصول اولیه در کارخانه i ،
 با استفاده از تکنولوژی e و با ظرفیت c

jc_j : هزینه تولید هر واحد محصول مصرفی در کارخانه
 تولید محصولات مصرفی j

$$(1 - r_j) \sum_i \sum_e h_{ije} = \sum_m qr_{jm} \quad \forall j \quad (23)$$

$$r_j \sum_i \sum_e h_{ije} = \sum_k b_{jk} \quad \forall j \quad (24)$$

$$\sum_m qs_{mi} + cv_i = \sum_j \sum_e h_{ije} \quad \forall i \quad (25)$$

$$\sum_i qs_{mi} = \sum_j qr_{jm} + \sum_l q_{lm} \quad \forall m \quad (26)$$

$$\sum_j h_{ije} \leq \sum_c CX_i^c X_i^{ec} \quad \forall i, e \quad (27)$$

$$\sum_l y_{kl} \leq CZ_k Z_k \quad \forall k \quad (28)$$

$$\sum_i qs_{mi} \leq CW_m W_m \quad \forall m \quad (29)$$

$$\sum_i \sum_e h_{ije} \leq CY_j \quad \forall j \quad (30)$$

$$\sum_e \sum_c x_i^{ec} = 1 \quad \forall i \quad (31)$$

$$x_i^{ec}, z_k, w_m \in \{0, 1\} \quad (32)$$

$$cv_i, h_{ije}, b_{jk}, y_{kl}, q_{lm}, qr_{jm}, qs_{mi} \geq 0 \quad (33)$$

در تابع هدف اول، سه عبارت اول مربوط به هزینه‌های ثابت مکان‌یابی تسهیلات می‌باشند. عبارت چهارم هزینه‌های تولید در کارخانه مواد اولیه را نشان می‌دهد و عبارت پنجم مربوط به هزینه‌های حمل از کارخانه تولید مواد اولیه می‌باشد. عبارات ششم و هفتم مربوط به هزینه حمل و هزینه عملیاتی از کارخانه‌های تولید محصولات و توزیع‌کننده‌ها می‌باشند. عبارات هشتم و نهم هزینه حمل از نقاط مصرف به مراکز جمع‌آوری و از کارخانجات تولید محصولات به مراکز جمع‌آوری را شامل می‌شود و در نهایت عبارت دهم بیان‌کننده میزان هزینه حمل از مراکز جمع‌آوری به کارخانجات تولید محصول اولیه و هزینه‌های عملیاتی در مراکز جمع‌آوری می‌باشد. در تابع هدف دوم در قسمت اول میزان کربن‌دی‌اکسید ناشی از تولید در کارخانه‌های تولید مواد اولیه و در سایر قسمت‌ها کربن‌دی‌اکسید ناشی از حمل و نقل کمینه می‌گردد. در

y_{kl} : مقدار محصول ارسالی از توزیع‌کننده k به نقاط مصرف l

q_{lm} : مقدار محصول ارسالی از منطقه مصرف l به مرکز جمع‌آوری m

qs_{mi} : مقدار محصول ارسالی از مرکز جمع‌آوری m به کارخانه تولید مواد اولیه i

qr_{jm} : مقدار محصول ارسالی از کارخانه تولید محصول j به مرکز جمع‌آوری m

۳-۳- مدل ریاضی قطعی

$$\begin{aligned} \text{Min } z_1 = & \sum_e \sum_i \sum_c FX_i^{ce} x_i^{ec} + \quad (14) \\ & \sum_k g_k z_k + \sum_m o_m w_m + \\ & \sum_i \sum_e \sum_c \sum_j p c_i^{ec} h_{ije} + \\ & \sum_i \sum_j \sum_e v_{ij} \mu h_{ije} + \sum_j \sum_k (v_{jk} \mu + \\ & j c_j) b_{jk} + \sum_k \sum_l (v_{kl} \mu + k c_k) y_{kl} + \\ & \sum_l \sum_m v_{lm} \mu q_{lm} + \\ & \sum_j \sum_m (v_{jm} \mu) qr_{jm} + \sum_m \sum_i (v_{mi} \mu + \\ & m c_m) qs_{mi} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{Min } z_1' = & \sum_i \sum_j \sum_e h_{ije} e n_e + \quad (15) \\ & \sum_i \sum_e \sum_c \sum_j v_{ij} \rho h_{ije} + \\ & \sum_j \sum_k v_{jk} \rho b_{jk} + \sum_k \sum_l v_{kl} \rho y_{kl} + \\ & \sum_l \sum_m v_{lm} \rho q_{lm} + \sum_j \sum_m v_{jm} \rho qr_{jm} + \\ & \sum_m \sum_i v_{mi} \rho qs_{mi} \end{aligned}$$

$$\text{Min } z_1'' = \sum_i \sum_j \sum_e h_{ije} w c_e \quad (16)$$

$$\text{Max } z_1' = \beta \quad (17)$$

$$\text{Max } z_1'' = \sum_i \sum_e \sum_c j o_i^{ec} x_i^{ec} + \quad (18) \\ \sum_k j d_k z_k + \sum_m j m_m w_m$$

$$\beta = \sum_e \sum_i \sum_c x_i^{ec} \quad (19)$$

$$\sum_k y_{kl} = d_l \quad \forall l \quad (20)$$

$$\sum_m q_{lm} = y_{kl} * f_l \quad \forall l \quad (21)$$

$$\sum_j b_{jk} = \sum_l y_{kl} \quad \forall k \quad (22)$$

یک مقدار جریمه نشدنی بودن در نظر می‌گیرد و این خود باعث می‌شود که مدل مورد نظر نشدنی نشود. در ادامه مدل ریاضی استوار تحت شرایط عدم قطعیت آورده شده است.

$$\begin{aligned} \text{Min } z_1 = & \sum_e \sum_i \sum_c F X_i^{ce} x_i^{ec} + \sum_k g_k z_k + \quad (34) \\ & \sum_m o_m w_m + \\ & \sum_s p b_s (\sum_i \sum_e \sum_c \sum_j p c_i^{ec} h_{ijes} + \\ & \sum_i \sum_j \sum_e v_{ij} \mu h_{ijes} + \sum_j \sum_k (v_{jk} \mu + \\ & j c_j) b_{jks} + \sum_k \sum_l (v_{kl} \mu + k c_k) y_{kls} + \\ & \sum_l \sum_m v_{lm} \mu q_{lms} + \\ & \sum_j \sum_m v_{jm} \mu q_{rjms} + \sum_m \sum_i (v_{mi} \mu + \\ & m c_m) q_{smis}) + \\ & \lambda_1 \sum_s p b_s [(\sum_i \sum_e \sum_c \sum_j p c_i^{ec} h_{ijes} + \\ & \sum_i \sum_j \sum_e v_{ij} \mu h_{ijes} + \sum_j \sum_k (v_{jk} \mu + \\ & j c_j) b_{jks} + \sum_k \sum_l (v_{kl} \mu + k c_k) y_{kls} + \\ & \sum_l \sum_m v_{lm} \mu q_{lms} + \\ & \sum_j \sum_m v_{jm} \mu q_{rjms} + \sum_m \sum_i (v_{mi} \mu + \\ & m c_m) q_{smis}) - \\ & \sum_{s'} p b_{s'} (\sum_i \sum_e \sum_c \sum_j p c_i^{ec} h_{ijes} + \\ & \sum_i \sum_j \sum_e v_{ij} \mu h_{ijes} + \sum_j \sum_k (v_{jk} \mu + \\ & j c_j) b_{jks} + \sum_k \sum_l (v_{kl} \mu + k c_k) y_{kls} + \\ & \sum_l \sum_m v_{lm} \mu q_{lms} + \\ & \sum_j \sum_m v_{jm} \mu q_{rjms} + \\ & \sum_m \sum_i (v_{mi} \mu + m c_m) q_{smis}) + \gamma \theta_{1s}] + \\ & \omega \sum_s \sum_l p b_s \delta_{sl} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{Min } z_1' = & \quad (35) \\ & \sum_s p b_s (\sum_i \sum_j \sum_e e n_e h_{ijes} + \\ & \sum_i \sum_j \sum_e v_{ij} \rho h_{ijes} + \sum_j \sum_k v_{jk} \rho b_{jks} + \\ & \sum_k \sum_l v_{kl} \rho y_{kls} + \sum_l \sum_m v_{lm} \rho q_{lms} + \\ & \sum_j \sum_m v_{jm} \rho q_{rjms} + \\ & \sum_m \sum_i v_{mi} \rho q_{smis}) + \\ & \lambda_2 \sum_s p b_s [(\sum_i \sum_j \sum_e e n_e h_{ijes} + \\ & \sum_i \sum_j \sum_e v_{ij} \rho h_{ijes} + \sum_j \sum_k v_{jk} \rho b_{jks} + \\ & \sum_k \sum_l v_{kl} \rho y_{kls} + \sum_l \sum_m v_{lm} \rho q_{lms} + \\ & \sum_j \sum_m v_{jm} \rho q_{rjms} + \\ & \sum_m \sum_i v_{mi} \rho q_{smis}) - \\ & \sum_{s'} p b_{s'} (\sum_i \sum_j \sum_e e n_e h_{ijes} + \\ & \sum_i \sum_j \sum_e v_{ij} \rho h_{ijes} + \sum_j \sum_k v_{jk} \rho b_{jks} + \\ & \sum_k \sum_l v_{kl} \rho y_{kls} + \sum_l \sum_m v_{lm} \rho q_{lms} + \\ & \sum_j \sum_m v_{jm} \rho q_{rjms} + \\ & \sum_m \sum_i v_{mi} \rho q_{smis}) + \gamma \theta_{2s}] \end{aligned}$$

$$\text{Min } z_1'' = \sum_i \sum_j \sum_e h_{ije} w c_e \quad (36)$$

تابع هدف سوم میزان استفاده از آب تکنولوژی منتخب در کارخانه‌های تولید مواد اولیه مورد توجه قرار گرفته است. در تابع هدف چهارم توزیع عادلانه شغل‌های ایجاد شده در نتیجه احداث کارخانه‌ها، بهینه می‌شود و در تابع هدف پنجم میزان مشاغل ایجاد شده ناشی از احداث تسهیلات بیشینه می‌شود.

محدودیت (۱۹) مربوط به تعداد کارخانه‌های تولیدی مواد اولیه می‌باشد. محدودیت (۲۰) ارضای تقاضای مناطق مصرف را تضمین می‌کند. محدودیت‌های (۲۱-۲۶) نشان‌دهنده رابطه تعادلی ورودی و خروجی مواد یا محصولات در مراکز مختلف می‌باشد. محدودیت (۲۷)، (۲۸)، (۲۹) و (۳۰) محدودیت ظرفیت برای تسهیلات مختلف در شبکه می‌باشند. محدودیت (۳۱) بیانگر این است که در هر مکان تنها یک کارخانه با ظرفیت و تکنولوژی مشخص می‌تواند احداث شود. محدودیت‌های (۳۲) و (۳۳) نیز نوع متغیرها را نشان می‌دهند.

۳-۴- مدل ریاضی استوار

مدل ارائه شده در بخش قبل مدلی برای حالت قطعی بود که در آن تمام پارامترهای مدل مورد نظر از قبل تعیین شده و مشخص هستند اما برای تطابق بیشتر مدل مورد نظر با شرایط دنیای واقعی و از آنجایی که میزان تقاضا معمولاً مشخص نبوده و با تکنیک‌های مختلف پیش‌بینی می‌شود، در این تحقیق تقاضا به صورت غیر قطعی بوده و به کمک سناریوهای مختلف وارد مدل‌سازی شده است.

در ادبیات در بیشتر موارد از میانگین‌گیری سناریوهای مختلف و حل مدل به صورت قطعی استفاده شده است، اما راه حل بهینه با استفاده از این روش‌ها برای رویارویی با عدم قطعیت کافی نمی‌باشد. برای مثال ممکن است مدل مورد نظر به ازای بعضی از داده‌های سناریوهای مختلف نشدنی شود. در اینجا از روش ارائه شده توسط مولوی و همکاران [۲۳] برای مدل‌سازی استفاده شده است. در این مدل قدر مطلق انحرافات هم در نظر گرفته می‌شود و مزیت دیگر این روش این است که برای تقاضاهایی که از میزان ظرفیت کل شبکه بیشتر می‌شوند

علاوه بر محدودیت‌های فوق محدودیت‌های دیگری باید در نظر گرفته شوند تا همان طور که در بخش برنامه‌ریزی پایدار به آن اشاره شد، مدل استوار خطی شود.

$$\begin{aligned} & (\sum_i \sum_e \sum_c \sum_j p c_i^{ec} h_{ijes} + \sum_i \sum_j \sum_e v_{ij} \mu h_{ijes} + \sum_j \sum_k (v_{jk} \mu + j c_j) b_{jks} + \sum_k \sum_l (v_{kl} \mu + k c_k) y_{kls} + \sum_l \sum_m v_{lm} \mu q_{lms} + \sum_j \sum_m v_{jm} \mu q r_{jms} + \sum_m \sum_i (v_{mi} \mu + m c_m) q s_{mis}) - \\ & \sum_s p b_s (\sum_i \sum_e \sum_c \sum_j p c_i^{ec} h_{ijes} + \sum_i \sum_j \sum_e v_{ij} \mu h_{ijes} + \sum_j \sum_k (v_{jk} \mu + j c_j) b_{jks} + \sum_k \sum_l (v_{kl} \mu + k c_k) y_{kls} + \sum_l \sum_m v_{lm} \mu q_{lms} + \sum_j \sum_m v_{jm} \mu q r_{jms} + \sum_m \sum_i (v_{mi} \mu + m c_m) q s_{mis}) + \theta_{1s} \geq 0 \quad \forall s \end{aligned} \quad (54)$$

$$\begin{aligned} & (\sum_i \sum_j \sum_e e n_e h_{ijes} + \sum_i \sum_j \sum_e v_{ij} \rho h_{ijes} + \sum_j \sum_k v_{jk} \rho b_{jks} + \sum_k \sum_l v_{kl} \rho y_{kls} + \sum_l \sum_m v_{lm} \rho q_{lms} + \sum_j \sum_m v_{jm} \rho q r_{jms} + \sum_m \sum_n v_{mi} \rho q s_{mis}) - \\ & \sum_s p b_s (\sum_i \sum_j \sum_e e n_e h_{ijes} + \sum_i \sum_j \sum_e v_{ij} \rho h_{ijes} + \sum_j \sum_k v_{jk} \rho b_{jks} + \sum_k \sum_l v_{kl} \rho y_{kls} + \sum_l \sum_m v_{lm} \rho q_{lms} + \sum_j \sum_m v_{jm} \rho q r_{jms} + \sum_m \sum_n v_{mi} \rho q s_{mis}) + \theta_{2s} \geq 0 \quad \forall s \end{aligned} \quad (55)$$

$$\begin{aligned} & (\sum_i \sum_j \sum_e w c_e h_{ijes}) - \sum_s p b_s (\sum_i \sum_j \sum_e w c_e h_{ijes}) + \theta_{3s} \geq 0 \quad \forall s \end{aligned} \quad (56)$$

۴- روش حل

روش حلی که در این تحقیق از آن استفاده شده است روش محدودیت جزئی فازی می‌باشد [۱۶]. مزیت این روش این است که مقادیر ارائه شده تابع هدف به صورت مقداری بین ۰ و ۱ بوده و تصمیم‌گیرنده راحت‌تر می‌تواند تصمیم‌گیری کند. همچنین برای حل مدل مورد نظر ۵

$$\text{Max } z_r' = \beta \quad (37)$$

$$\text{Max } z_r'' = \sum_i \sum_e \sum_c j o_i^{ec} x_i^{ec} + \sum_k j d_k z_k + \sum_m j m_m w_m \quad (38)$$

$$\beta = \sum_e \sum_i \sum_c x_i^{ce} \quad (39)$$

$$\sum_k y_{kls} + \delta_{ls} = d_{ls} \quad \forall l, s \quad (40)$$

$$\sum_m q_{lms} = \sum_k y_{kls} * f_l \quad \forall l, s \quad (41)$$

$$\sum_j b_{jks} = \sum_l y_{kls} \quad \forall k, s \quad (42)$$

$$(1 - r_j) \sum_i \sum_e h_{ijes} = \sum_m q r_{jms} \quad \forall j, s \quad (43)$$

$$r_j \sum_i \sum_e h_{ijes} = \sum_k b_{jks} \quad \forall j, s \quad (44)$$

$$\sum_m q s_{mis} + c v_{is} = \sum_j \sum_e h_{ijes} \quad \forall i, s \quad (45)$$

$$\sum_i q s_{mis} = \sum_j q r_{jms} + \sum_l q_{lms} \quad \forall m, s \quad (46)$$

$$\sum_j h_{ijes} \leq \sum_c C X_i^{ec} X_i^{ec} \quad \forall i, e, s \quad (47)$$

$$\sum_l y_{kls} \leq C Z_k Z_k \quad \forall k, s \quad (48)$$

$$\sum_i q s_{mis} \leq C W_m W_m \quad \forall m, s \quad (49)$$

$$\sum_i \sum_e h_{ijes} \leq C Y_j \quad \forall j, s \quad (50)$$

$$\sum_e \sum_c x_i^{ec} = 1 \quad \forall i \quad (51)$$

$$x_i^{ec}, z_k, w_m \in \{0, 1\} \quad (52)$$

$$c v_{is}, h_{ijes}, b_{jks}, y_{kls}, q_{lms}, q r_{jms}, q s_{mis}, \theta_{1s}, \theta_{2s}, \theta_{3s} \geq 0 \quad (53)$$

در تابع هدف اول سه عبارت اول هزینه‌های ثابت و عبارت دوم داخل پرانتز مقدار میانگین هزینه‌ها و سایر عبارات انحراف معیار تابع هدف از میانگین را نشان می‌دهند. در تابع هدف دوم نیز عبارات داخل پرانتز اول میانگین و سایر عبارات مقدار انحراف تابع هدف از میانگین را نشان می‌دهند مقدار δ_{ls} در محدودیت (۴۰) مقدار نشدنی بودن را به ازای سناریوهای مختلف نشان می‌دهد. از توضیح سایر عبارات به دلیل یکسان بودن و توضیح در مدل قطعی خودداری می‌گردد.

برای حل مدل مورد نظر از صنعت فولاد به عنوان مطالعه موردی استفاده شده است و دلیل استفاده از این صنعت نیز این است که این صنعت یکی از صنایعی است که بیشترین سهم را در ایجاد آلاینده‌های ناشی از فعالیت‌های بشر دارد. به طوری که امروزه تخمین زده شده است که صنعت تولید فولاد حدود ۴ تا ۵ درصد کل گازهای گلخانه‌ای ایجاد شده توسط بشر را تولید می‌کند. که بیشتر این میزان تولید گاز کربن‌دی‌اکسید ناشی از فرایند تولید فولاد خام می‌باشد. همچنین این صنعت یکی از مهم‌ترین صنایعی است که موجب ایجاد اشتغال در کشورهای که دارای این صنعت هستند می‌باشد. در این شبکه در جهت رو به جلو در کارخانه‌ها، از قراضه‌های جمع‌آوری شده و مواد جدید خریداری شده فولاد خام تولید می‌شود. سپس این فولاد خام به کارخانه‌های دیگر منتقل می‌شود و محصولات نهایی مانند پروفیل حاصل می‌گردد. محصول نهایی تولید شده در نهایت توسط توزیع کنندگان در اختیار نقاط مصرف قرار می‌گیرد. محصولات استفاده شده پس از اسقاط در مراکز جمع‌آوری، گردآوری می‌شوند. البته جریان دیگری از ضایعات نیز به مراکز جمع‌آوری وارد می‌شود و آن ضایعات تولیدی در کارخانه‌های تولید فلزات می‌باشد. این قراضه‌های تولیدی در نهایت مجدداً به کارخانه تولید فلزات منتقل شده و در آنجا مورد مصرف دوباره قرار می‌گیرند و چرخه به همین صورت ادامه می‌یابد. شکل ۲ شبکه جریان مواد و محصولات صنعت فولاد را نشان می‌دهد. این شکل با توجه به مقالات مرتبط در زمینه فولاد [۱۱] و پرس و جو از خبرگان این صنعت بدست آمده است.

داده‌های مورد استفاده در مدل با استفاده از افراد خبره در صنعت فولاد و مقاله‌های مرتبط در زمینه فولاد [۱۱] ، [۲۶] و همچنین نرم افزار ECO-it (مربوط به داده‌های محیط زیست) تهیه شده‌اند.

با استفاده از روش مجموع وزنی، توابع هدف مرتبط با محیط زیست با هم و توابع هدف ناظر به مسائل اجتماعی با یکدیگر ترکیب شدند. به این ترتیب که برای مطلوبیت

تابع هدف ارائه شده در قالب ۳ تابع هدف هزینه، محیط زیست (میزان کربن‌دی‌اکسید تولید شده و آب) و مسئولیت پذیری اجتماعی (میزان مشاغل ایجاد شده و عدالت در ایجاد مشاغل) ترکیب شده است.

در این روش ابتدا باید مقدار تابع هدف بهینه (z^{opt}) را بدست آورد که مقدار آن با حل مدل برنامه‌ریزی خطی با صرف نظر از سایر اهداف بدست می‌آید. حال مقدار z^{nad} طبق روش ارائه شده در مقاله ترابی و همکاران [۲۵] به صورت زیر بدست می‌آید. اگر بردار تصمیم مربوط به مقدار بهینه تابع هدف h باشد.

در توابع هدف بیشینه‌سازی:

$$z_h^{nad} = \min_h \{z_h(v_h^*)\} \quad (57)$$

در توابع هدف کمینه‌سازی:

$$z_h^{nad} = \max_h \{z_h(v_h^*)\} \quad (58)$$

میزان مطلوبیت هر تابع هدف به صورت زیر مشخص می‌شود.

در توابع بیشینه‌سازی:

$$\mu_h(v) = \begin{cases} 1 & \text{if } z_h > z_h^{opt} \\ \frac{z_h - z_h^{nad}}{z_h^{opt} - z_h^{nad}} & \text{if } z_h^{opt} \leq z_h \leq z_h^{nad} \\ 0 & \text{if } z_h < z_h^{nad} \end{cases}$$

در توابع کمینه‌سازی:

$$\mu_h(v) = \begin{cases} 1 & \text{if } z_h < z_h^{opt} \\ \frac{z_h^{nad} - z_h}{z_h^{nad} - z_h^{opt}} & \text{if } z_h^{opt} \leq z_h \leq z_h^{nad} \\ 0 & \text{if } z_h > z_h^{nad} \end{cases}$$

و در نهایت حل مدل به صورت زیر در می‌آید.

$$\text{Max } \mu_1(v) \quad (59)$$

s.t

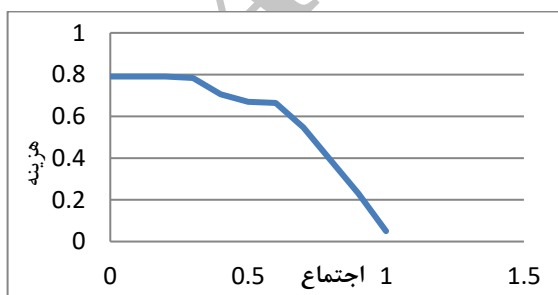
$$\mu_2(v) \geq \varepsilon \quad (60)$$

$$\mu_3(v) \geq \varepsilon \quad (61)$$

$$x \in F(X), \varepsilon \in [0, 1] \quad (62)$$

حل مدل را نشان می‌دهد و تصمیم گیرنده با توجه به مطلوبیت خود می‌تواند در مورد شبکه مورد نیاز خود تصمیم گیری کند. از طرفی میزان انحراف از میانگین هزینه‌ها در تمام موارد در مدل استوار کمتر از مدل قطعی می‌شود که این خود نشان دهنده کاهش ریسک هنگام استفاده از مدل استوار می‌باشد. همچنین افزایش مطلوبیت تابع محیط زیست و اجتماع موجب افزایش هزینه می‌شود و تصمیم گیرنده با توجه به هزینه ای که صرف می‌شود و با توجه به میزان مطلوبیت توابع هدف تصمیم گیری می‌کند.

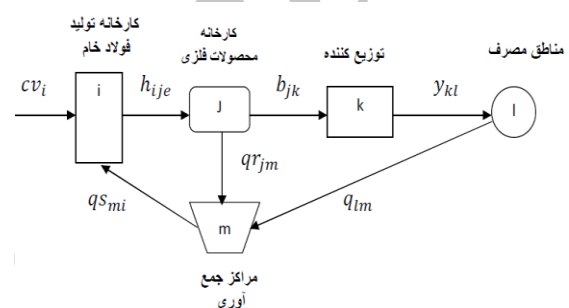
شکل‌های ۳، ۴ و ۵ منحنی پارتویی برای مقایسه توابع هدف مختلف را نشان می‌دهند. برای رسم این منحنی های پارتویی مقدار یکی از توابع هدف ثابت در نظر گرفته شده و به مقایسه دو تابع هدف دیگر پرداخته شده است. شکل ۳ رابطه بین تابع هدف هزینه و تابع هدف مربوط به مسائل اجتماعی را نشان می‌دهد. همان طور که مشاهده می‌شود با افزایش مطلوبیت تابع هدف مربوط به مسائل اجتماعی، مطلوبیت هزینه کاهش می‌یابد و علت آن این است که با افزایش میزان مطلوبیت تابع هدف مسائل اجتماعی میزان تسهیلات احداث شده بیشتر می‌شود و همچنین تعداد کارخانه‌های کوچک مقیاس بیشتر شده و این باعث افزایش هزینه‌ها و در نتیجه کاهش میزان مطلوبیت آن می‌شود.



شکل ۳- رابطه مطلوبیت هزینه و اجتماع

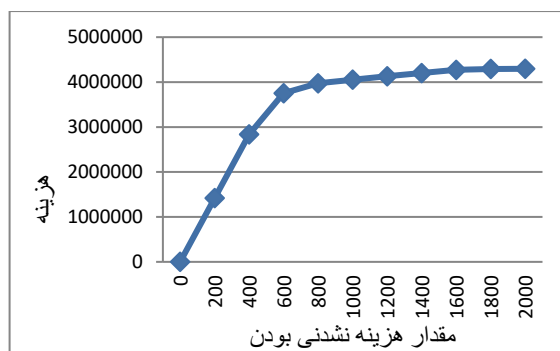
کربن دی اکسید مقدار وزن ۰,۶ و برای مطلوبیت آب مقدار وزن ۰,۴ در نظر گرفته شده است. به همین ترتیب تابع هدف عدالت در ایجاد مشاغل با وزن ۰,۴ و تعداد مشاغل ایجاد می‌شود با وزن ۰,۶ با هم ترکیب شده و تابع هدف مربوط به مسائل اجتماعی را ایجاد کردند که این مقادیر با انجام مصاحبه با افراد خبره در صنعت فولاد به دست آمده‌اند.

مدل مورد نظر به کمک نرم افزار گمز و در رایانه‌ای با مشخصات CPU ۲,۵GHz , ۴ GB RAM حل شده است.

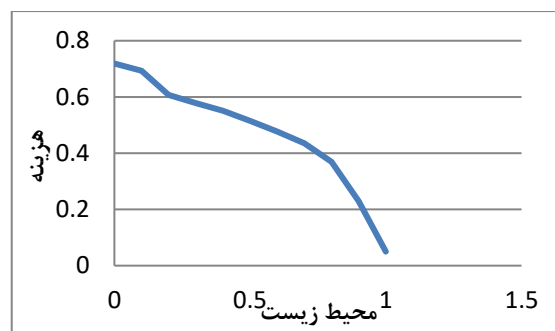


شکل ۲- شبکه زنجیره رو به جلو و عقب فولاد

برای مقایسه مدل قطعی و استوار مقدار توابع هدف مرتبط با محیط زیست و مسائل اجتماعی در هر دو به عنوان محدودیت در نظر گرفته شده و برای مقادیر مختلف ϵ حل شده‌اند. به همین منظور برای ۱۰ مقدار متفاوت ϵ سناریوهای مختلفی با کمک چرخ گردون تولید شدند. سپس با در نظر گرفتن مقداری هزینه برای هر واحد اضافی تولید شده و هر واحد کمبود، هزینه‌های حاصل از هر دو مدل قطعی و استوار در جدول ۱ مقایسه شده‌اند. همان طور که در جدول دیده می‌شود، مدل استوار دارای میانگین و انحراف معیار هزینه کمتری نسبت به مدل قطعی می‌باشد. همچنین با توجه به جدول مشاهده می‌شود با افزایش میزان مطلوبیت توابع مربوط به محیط زیست و مسائل اجتماعی میزان هزینه‌ها هم در مدل قطعی و هم در مدل استوار افزایش می‌یابد. که این صحت



شکل ۶ - رابطه هزینه کل و هزینه نشدنی بودن



شکل ۴ - رابطه مطلوبیت هزینه و محیط زیست

۵- نتیجه گیری

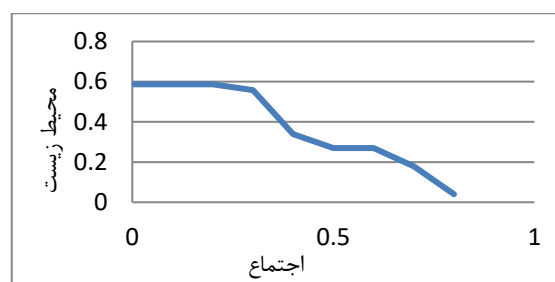
در این تحقیق یک مدل برنامه‌ریزی خطی استوار چند هدفه برای طراحی شبکه زنجیره تأمین با در نظر گرفتن جریان رو به جلو و عقب در شبکه زنجیره تأمین ارائه شد. در این مدل سه تابع هدف هزینه توجه به محیط زیست و موضوعات اجتماعی به طور همزمان مورد بررسی قرار گرفته است. در تابع هدف محیطی علاوه بر میزان کربن‌دی‌اکسید تولید شده، مقدار آب مصرفی نیز بهینه می‌شود. همچنین در نظر گرفتن عدالت در ایجاد مشاغل و یا در نظر گرفتن پدافند غیر عامل که برای اولین بار مورد توجه قرار گرفته‌اند. به علاوه، در مدل ارائه شده برای مکان‌های بالقوه، تکنولوژی و ظرفیت‌های متفاوت در نظر گرفته شده است. لازم به ذکر است که برای در نظر گرفتن عوامل اجتماعی و محیطی از ایزو ۲۶۰۰۰ ایده گرفته شده است.

از صنعت فولاد به عنوان مطالعه موردی برای مدل ارائه شده استفاده شد مدل مورد نظر به کمک روش محدودیت جزئی فازی حل شد و نتایج نشان دادند که مدل استوار کارایی بهتری نسبت به مدل قطعی دارد. به طوری که استفاده از مدل استوار در شرایط غیر قطعی موجب کاهش میانگین هزینه‌ها و همچنین انحراف معیار هزینه‌ها می‌شود.

به علاوه مقایسه تابع هدف‌های هزینه با تأثیرات محیطی و مسئولیت اجتماعی نشان داده است که کم شدن تأثیرات محیطی فعالیت‌های صنعتی نیازمند افزایش

با افزایش مقدار مطلوبیت تابع هدف مربوط به محیط زیست مقدار هزینه افزایش یافته و بنابراین میزان مطلوبیت آن کاهش می‌یابد و این در شکل ۴ نشان داده شده است.

در نهایت در شکل ۵ نیز رابطه بین میزان توابع هدف محیط زیست و مسائل اجتماعی آورده شده است. همان طور که از شکل پیداست افزایش مطلوبیت مسائل اجتماعی باعث کاهش در میزان مطلوبیت تابع هدف محیط زیست می‌گردد. در نتیجه تصمیم گیرنده با توجه به میزان مطلوبیت خود در توابع هدف مختلف می‌تواند در مورد طراحی شبکه تصمیم‌گیری کند.



شکل ۵ - رابطه مطلوبیت محیط زیست و اجتماع

در مقاله مولوی و همکاران [۲۳] اثبات شده است که با افزایش میزان هزینه جریمه نشدنی بودن محدودیت‌ها باید مقدار هزینه به صورت نمایی افزایش داشته باشد که در شکل ۶ این واقعیت قابل مشاهده می‌باشد.

روش‌های حل ابتکاری و فرا ابتکاری مانند الگوریتم ژنتیک چند هدفه برای مساله با مقیاس بزرگ بهره گرفت.

هزینه است. همچنین ایجاد مشاغل و ایجاد عدالت در مشاغل هم نیازمند هزینه می‌باشد و تصمیم گیرنده با توجه به هزینه‌های ایجاد شده می‌تواند در مورد انتخاب تکنولوژی‌ها تصمیم بگیرد.

در مطالعات آینده می‌توان مدل را به صورت چند دوره‌ای در نظر گرفت و از پارامترهای اجتماعی دیگری مانند اولویت دهی به تامین کنندگان محلی بهره جست و از

جدول ۱ مقایسه هزینه دو مدل قطعی و استوار

ردیف	تکرار	E_1, E_2 .۴ و .۴		E_1, E_2 .۴ و .۶		E_1, E_2 .۶ و .۶		E_1, E_2 .۸ و .۶		E_1, E_2 .۸ و .۸	
		برنامه ریزی ی استوار	قطعی	برنامه ریزی ی استوار	قطعی	برنامه ریزی ی استوار	قطعی	برنامه ریزی ی استوار	قطعی	برنامه ریزی ی استوار	قطعی
۱	۱	۴۰۴۹۱۰	۳۸۰۷۰۷	۴۰۱۰۴۹	۳۸۴۵۳	۴۰۹۶۳۰	۳۹۲۵۲۷	۴۴۸۱۳۷	۴۰۹۱۹۰	۴۹۲۹۹۸۵	۴۵۰۵۶۰۳
	۹		۲	۴	۵۲	۶	۳	۹	۵		
۲	۲	۴۰۲۷۴۲	۴۵۹۳۱۲	۴۰۵۲۴۹	۴۷۰۳۲	۴۱۳۷۱۵	۴۷۶۷۹۳	۴۳۷۴۲۹	۴۹۹۴۲۱	۴۸۱۶۹۵۳	۴۷۷۴۶۸۸
	۸		۵	۸	۹۰	۱	۲	۹	۸		
۳	۱	۴۰۴۹۱۰	۳۸۰۷۰۷	۴۰۱۰۴۹	۳۸۴۵۳	۴۰۹۶۳۰	۳۹۲۵۲۷	۴۴۸۱۳۷	۴۰۹۱۴۹	۴۹۲۹۹۸۵	۴۵۰۵۶۰۳
	۹		۲	۴	۵۲	۶	۳	۹	۸		
۴	۳	۵۴۴۸۵۷	۶۰۶۹۴۶	۵۵۳۳۵۸	۶۱۸۱۳۳	۵۶۱۸۱۴	۶۲۴۵۳۱	۵۲۲۲۱۳	۶۴۷۰۹۸	۵۰۱۲۴۳۸	۶۰۵۳۷۲۱
	۳		۲	۷	۴	۷	۹	۳	۹		
۵	۳	۵۴۴۸۵۷	۶۰۶۹۴۶	۵۵۳۳۵۸	۶۱۸۱۳۳	۵۶۱۸۱۴	۶۲۴۵۳۱	۵۲۲۲۱۳	۶۴۷۰۹۸	۵۰۱۲۴۳۸	۶۰۵۳۷۲۱
	۳		۲	۷	۴	۷	۹	۳	۹		
۶	۴	۴۳۱۶۱۳	۳۹۲۵۳۳	۴۲۶۲۳۵	۳۹۴۵۸	۴۳۵۰۹۸	۴۰۱۸۶۱	۴۶۷۱۹۵	۴۱۶۳۲۸	۵۱۳۸۱۸۷	۴۹۴۲۸۴۰
	۱		۸	۴	۰۶	۶	۰	۲	۳		
۷	۱	۴۰۴۹۱۰	۳۸۰۷۰۷	۴۰۱۰۴۹	۳۸۴۵۳	۴۰۹۶۳۰	۳۹۲۵۲۷	۴۴۸۱۳۷	۴۰۹۱۴۹	۴۹۲۹۹۸۵	۴۵۰۵۶۰۳
	۹		۲	۴	۵۲	۶	۳	۹	۸		
۸	۳	۵۴۴۸۵۷	۶۰۶۹۴۶	۵۵۳۳۵۸	۶۱۸۱۳۳	۵۶۱۸۱۴	۶۲۴۵۳۱	۵۲۲۲۱۳	۶۴۷۰۹۸	۵۰۱۲۴۳۸	۶۰۵۳۷۲۱
	۳		۲	۷	۴	۷	۹	۳	۹		
۹	۵	۴۶۳۳۹۹	۴۰۷۰۱۶	۴۶۵۹۱۶	۴۱۰۹۲	۴۶۸۰۸۳	۴۱۶۸۷۹	۴۷۹۶۵۲	۴۳۱۳۴۰	۵۲۸۰۳۱۵	۴۷۵۱۰۴۳
	۰		۱	۱	۵۰	۹	۵	۳	۳		
۱۰	۲	۴۰۲۷۴۲	۴۵۹۳۱۲	۴۰۵۲۴۹	۴۷۰۳۲	۴۱۳۷۱۵	۴۷۶۷۹۳	۴۳۸۶۷۵	۴۹۹۴۲۱	۴۸۱۶۹۵۳	۴۷۷۴۶۸۸
	۸		۵	۸	۹۰	۱	۲	۹	۸		
میانگین		۴۵۴۹۸۰	۴۶۸۱۱۳	۴۵۶۵۸۷	۴۷۵۴۱۶	۴۶۴۴۹۴	۴۸۲۳۵۰	۴۷۳۴۰۰	۵۰۱۵۲۹	۵۰۳۸۵۸۶	۵۰۵۸۸۸۵
	۲		۵	۵	۹	۹	۵	۷	۹		
انحراف معیار		۶۴۸۳۲۱	۱۰۰۱۹۰	۶۹۶۲۳۴	۱۰۳۶۱۶	۶۹۵۰۴۵	۱۰۳۱۰۶	۳۵۹۶۲۸	۱۰۶۲۲۳	۱۴۰۷۹۴	۶۷۸۷۳۹
			۵		۸		۲		۹		

۶- مراجع

- [۱] ISO/TMB/WG/SR. (۲۰۰۶). "Participating in the Future International Standard ISO ۲۶۰۰۰ on Social Responsibility". International Organization for Standardization, Geneva.
- [۲] نیک نژاد، د.، (۱۳۸۸). بررسی پیامدهای ناشی از گازه‌های گلخانه‌ای و اثرات آن بر روی کره زمین، سومین کنفرانس محیط زیست، تهران.
- [۳] Fleischmann, M., Beullens, P., Bloemhof-Ruwaard, J.M., Van Wassenhove L.N. (۲۰۰۱). "Supply-chain network configuration for product recovery". *Production Planning & Control*, 15, 270-281.
- [۴] Beamon, B.M., & Fernandes, C. (۲۰۰۴). "Supply-chain network configuration for product recovery". *Production Planning & Control*, vol. 15, pp. 270-281..
- [۵] KO, H.J., Evans, G.W. (۲۰۰۷). "A genetic algorithm-based heuristic for the dynamic integrated forward/reverse logistics network for 3PLs". *Computers & Operations Research*, vol. 34, pp. 346-366.
- [۶] Salema, M.I.G., Barbosa-Povoa, A.P., Novais, A.Q. (۲۰۰۷). "An optimization model for the design of a capacitated multi-product reverse logistics network with uncertainty". *European Journal of Operational Research*, vol. 179, pp. 1063-1077.
- [۷] Pishvae, M.S., Jolai, F., Razmi, J. (۲۰۰۹). "A stochastic optimization model for integrated forward/reverse logistics network design". *Journal of Manufacturing Systems*, vol. 28, pp. 107-114.
- [۸] El-Sayed, M., Afia, N., El-Kharbotly, A. (۲۰۱۰). "A stochastic model for forward-reverse logistics network design under risk". *Computers & Industrial Engineering*, vol. 58, pp. 423-431.
- [۹] Pishvae, M.S., Torabi, S.A. (۲۰۱۰). "A possibilistic programming approach for closed-loop supply chain network design under uncertainty". *Fuzzy Sets and Systems*, vol. 161, pp. 2668-2683.
- [۱۰] Pishvae, M.S., Rabbani M., Torabi, S.A. (۲۰۱۱). "A robust optimization approach to closed-loop supply chain network design under uncertainty". *Applied Mathematical Modelling*, vol. 35, pp. 637-649.
- [۱۱] Vahdani, B., Tavakkoli-Moghaddam, R., Modarres, M., Baboli, A. (۲۰۱۲). "Reliable design of a forward/reverse logistics network under uncertainty: A robust-M/M/c queuing model," *Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review*, vol. 48, pp. 1152-1168.
- [۱۲] Hasani, A., Zegordi, S.H., Nikbakhsh, E. (۲۰۱۲). "Robust closed-loop supply chain network design for perishable goods in agile manufacturing under uncertainty". *International Journal of Production Research*, vol. 50, pp. 4649-4669.
- [۱۳] Ramezani, M., Bashiri, M., Tavakkoli-Moghaddam, R. (۲۰۱۳). "A new multi-objective stochastic model for a forward/reverse logistic network design with responsiveness and quality level". *Applied Mathematical Modelling*, vol. 37, pp. 328-344.
- [۱۴] Faccio, M., Persona, A., Sgarbossa, F., Zanin, G. (۲۰۱۳). "Sustainable SC through the complete reprocessing of end-of-life products by manufacturers: A traditional versus social responsibility company perspective". *European Journal of Operational Research*.
- [۱۵] Amin, S.H., & Zhang, G. (۲۰۱۲). "A multi-objective facility location model for closed-loop supply chain under uncertain demand and return". *Applied Mathematical Modeling*, vol. 37, pp. 4165- 4176.
- [۱۶] Pishvae, M.S., Razmi, J. (۲۰۱۲). "Environmental supply chain network design using multi-objective fuzzy mathematical programming". *Applied Mathematical Modelling*, vol. ۳۶, pp. ۳۴۳۳-۳۴۴۶.
- [۱۷] Wang, Y., Zhu, X., Lu, T., Jeeva, A.S. (۲۰۱۳) "Eco-efficient based logistics network design in hybrid manufacturing/ remanufacturing system in low-carbon economy". *Journal of Industrial Engineering and Management*, vol. ۶, pp. ۲۰۰-۲۱۴.

- [۱۸] Carter, C.R., Jennings, M.M. (۲۰۰۲). "Social responsibility and supply chain relationships". *Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review*, vol. 38, pp. 37-52.
- [۱۹] Cruz, J.M., & Wakolbinger, T. (۲۰۰۸). "Multiperiod effects of corporate social responsibility on supply chain networks, transaction costs, emissions, and risk," *International Journal of Production Economics*, vol. 116, pp. 61-74.
- [۲۰] Cruz, J.M. (۲۰۰۹). "The impact of corporate social responsibility in supply chain management: Multicriteria decision-making approach". *Decision Support Systems*, vol. 48, pp. 224-236.
- [۲۱] Dehghanian F., Mansour, S. (۲۰۰۹). "Designing sustainable recovery network of end-of-life products using genetic algorithm". *Resources, Conservation and Recycling*, vol. 53, pp. 559-570.
- [۲۲] Pishvae, M.S., Razmi, J., Torabi, S.A. (۲۰۱۲). "Robust possibilistic programming for socially responsible supply chain network design: A new approach". *Fuzzy Sets and Systems*, vol. 206, pp. 1-20.
- [۲۳] Mulvey, J.M. Vanderbei, R.J., Zenios, S.A. (۱۹۹۵). "Robust optimization of large-scale systems. *Operations Research*". *Operations Research*, vol 43, pp.264-281.
- [۲۴] Yu, C.S., Li, H.L. (۲۰۰۰). "A robust optimization model for stochastic logistic problems". *International Journal of Production Economics*, vol. 64, pp. 385-397.
- [۲۵] Torabi, S.A., Hassini, E. (۲۰۰۸). "An interactive possibilistic programming approach for multiple objective supply chain master planning". *Fuzzy Sets and Systems*, vol. 159, pp. 193-214.
- [۲۶] Strezov, V., Evans, A., Evans, T. (۲۰۱۳) "Defining sustainability indicators of iron and steel production" . *Journal of Cleaner Production*, vol. 51, pp. 66-70.