

یک مدل برنامه‌ریزی فازی - احتمالی استوار برای طراحی پایای شبکه زنجیره تأمین

رضا قسمتی^۱، مهدی غضنفری^{۲*} میرسامان پیشوایی^۳

۱. کارشناس ارشد دانشکده مهندسی صنایع، دانشگاه علم و صنعت

۲. استاد دانشکده مهندسی صنایع، دانشگاه علم و صنعت

۳. استادیار دانشکده مهندسی صنایع، دانشگاه علم و صنعت

(تاریخ دریافت ۹۳/۰۹/۰۱ - تاریخ دریافت روایت اصلاح‌شده ۹۴/۰۶/۲۸ - تاریخ تصویب ۹۴/۱۱/۰۶)

چکیده

تصمیمات مربوط به طراحی شبکه زنجیره تأمین جزء تصمیمات راهبردی مدیریت زنجیره تأمین است که نقش بسزایی در عملکرد کارای زنجیره تأمین ایفا می‌کند، اما دو عامل مهم و تأثیرگذار بر عملکرد زنجیره تأمین از یک سو وقوع اختلالات احتمالی و آسیب‌های ناشی از آن و از سوی دیگر ماهیت غیرقطعی پارامترهای معمول کسب‌وکار است. در نتیجه، شبکه زنجیره تأمین طراحی شده باید در برابر وقوع اختلال پایا و در مواجهه با عدم قطعیت معمول کسب‌وکار استوار باشد. این پژوهش یک مدل جدید برنامه‌ریزی فازی-احتمالی استوار برای طراحی یک شبکه زنجیره تأمین چنددوره‌ای ارائه می‌دهد که به‌طور هم‌زمان به این دو موضوع مهم پرداخته است. ابتدا به‌منظور طراحی پایای مدل، با در نظر گرفتن دو نوع تسهیل آسیب‌ناپذیر و آسیب‌پذیر در برابر وقوع اختلالات احتمالی یک رویکرد بدبینانه سخت به کار گرفته شد و سپس برای مواجهه با عدم قطعیت معمول کسب‌وکار یک مدل فازی استوار توسعه داده شد. انعطاف‌پذیری در محدودیت‌(های) مشتری و تعیین سطح بهینه این محدودیت‌(ها) نیز در مدل مذکور مطالعه شده است. به‌علاوه، به‌منظور توسعه مفهوم قابلیت اطمینان در این مسئله و پوشش دادن ویژگی‌های مهمی از مسائل دنیای واقعی، اختلال جزئی غیرقطعی و محدودیت زمان مورد انتظار مشتری در مدل‌سازی مسئله لحاظ شده است. در انتها به‌منظور نمایش اثربخشی و کاربردی بودن مدل توسعه‌داده شده، از مطالعه موردی مربوط به یک شرکت فعال در نظام سلامت ایران استفاده شده است.

واژه‌های کلیدی: اختلال جزئی غیرقطعی، برنامه‌ریزی استوار، شدت اختلال، طراحی پایای شبکه زنجیره تأمین.

مقدمه

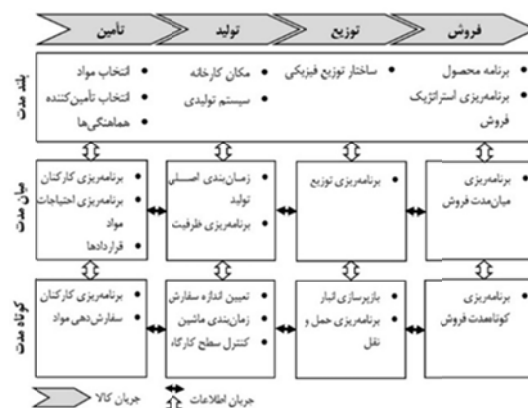
این تصمیمات مربوط به طراحی شبکه زنجیره تأمین به‌عنوان بخشی از برنامه‌ریزی راهبردی زنجیره تأمین، تأثیرات بسزایی بر عملکرد کلی زنجیره دارد. همان‌طور که در ماتریس برنامه‌ریزی زنجیره تأمین [۱] (شکل ۱) نمایان است، به مکان‌یابی تسهیلات و کارخانه‌ها و ساختار شبکه توزیع در افق زمانی بلندمدت توجه شده است. در واقع، این دو موضوع تشکیل‌دهنده ساختار شبکه زنجیره تأمین هستند. از آنجا که برنامه‌ریزی در زمینه تصمیمات تاکتیکی و میان‌مدت همچون برنامه‌ریزی توزیع، انتخاب روش حمل‌ونقل مناسب و... و همچنین تصمیمات عملیاتی و کوتاه‌مدت مربوط به مدیریت جریان کالا بین تسهیلات بعد از استقرار و اجرای تصمیمات راهبردی صورت می‌پذیرد، ساختار شبکه زنجیره تأمین، نقشی حیاتی در اتخاذ بهینه

این تصمیمات ایفا می‌کند. در نتیجه، به‌منظور اجتناب از زبربهرینگی ناشی از تصمیم‌گیری مجزا در سطوح راهبردی و تاکتیکی/ عملیاتی، ممکن است این تصمیمات به‌صورت یکپارچه در طراحی شبکه زنجیره تأمین لحاظ شوند، اما چالشی جدی که پژوهشگران در طراحی شبکه زنجیره تأمین با آن مواجه‌اند، عدم قطعیت پیش رو در محیط ناشناخته کسب‌وکار است. تصمیمات راهبردی مربوط به طراحی شبکه زنجیره تأمین برای یک افق زمانی بلندمدت اتخاذ می‌شود و همچنین تغییر این تصمیمات هزینه‌های بسیاری در پی دارد؛ بنابراین، در نظر گرفتن عدم قطعیت در مرحله طراحی شبکه امری اجتناب‌ناپذیر است. در کل، دو نوع عدم قطعیت که تأثیرات بسزایی بر عملکرد زنجیره تأمین دارند عبارت‌اند از [۲، ۳]: ۱. عدم قطعیت معمول

بازیابی شده و هزینه‌های حمل‌ونقل دارای عدم قطعیت هستند. پیشوایی و همکاران [۷] پس از مطالعه مسئولیت اجتماعی در مسائل طراحی شبکه زنجیره تأمین، رویکرد جدید برنامه‌ریزی استوار امکانی را برای بهینه‌سازی ساختار شبکه زنجیره تأمین با توجه به هر دو هدف اقتصادی و اجتماعی در شرایط عدم قطعیت ارائه کردند.

چالش مهم دیگر در طراحی شبکه زنجیره تأمین، اختلال و ریسک‌های همراه آن است. درکل، ریسک معیاری است که به‌صورت احتمال وقوع در شدت آثار نامطلوب یک پدیده تعریف می‌شود [۸]. در نتیجه، شدت اختلال باید در مدل‌سازی ریسک‌های اختلال لحاظ شود. شدت اختلال در یک زنجیره تأمین شامل طیفی از اختلال جزئی تا اختلال کامل است. کلیندورفر و سعد [۳] منابع ریسک‌زای وقوع اختلال را به سه دسته تقسیم کردند: ۱. ریسک‌های عملیاتی از قبیل خرابی تجهیزات و قطع ناگهانی تأمین (به دلیل ورشکستگی تأمین‌کننده اصلی)؛ ۲. بلایای طبیعی همچون سیل و زلزله؛ ۳. حملات تروریستی و بی‌ثباتی سیاسی. خرابی برخی از تجهیزات، قطع بخشی از تأمین، حوادث طبیعی با شدت کم و... ممکن است اختلال جزئی را در پی داشته باشد، درحالی‌که با افزایش شدت اختلال ممکن است یک یا چند تسهیل به‌طور کامل از بین برود که اختلال کامل نامیده می‌شود. وقوع اختلالات در زنجیره‌های تأمین، جزئی یا کامل ممکن است به پیامدهای جدی عملیاتی همانند افزایش هزینه‌های حمل‌ونقل، تأخیر سفارشات، کمبود موجودی، ازدست‌رفتن سهم بازار و در سطحی بالاتر آثار مالی منفی بلندمدتی منجر شود [۹]. هدف از طراحی پایای^۴ شبکه زنجیره تأمین توسعه مدل‌هایی است که هم در شرایط عادی و هم در شرایط وقوع اختلال، عملکردی قابل قبول و کارا داشته باشند. باین‌حال، پژوهش‌های موجود در ادبیات از شدت اختلال در طراحی پایای شبکه زنجیره تأمین غفلت ورزیده‌اند. اغلب مقالات فقط بر اختلال کامل تمرکز داشته‌اند [۹-۱۴] و تعداد کمی از آن‌ها به اختلال جزئی توجه کرده‌اند [۱۵] که در آن نیز اختلال جزئی به‌صورت قطعی مدل‌سازی شده است. در این پژوهش، برای مدل‌سازی اختلال یک پارامتر غیرقطعی در بازه [۱ و ۰] به‌عنوان کسری از ظرفیت خدمت‌دهی تسهیل آسیب‌پذیر تعریف شده است که به‌واسطه وقوع اختلال از بین می‌رود؛

کسب‌وکار^۱ مانند عدم قطعیت مربوط به تقاضا، قیمت مواد اولیه، هزینه‌های تولید، هزینه‌های حمل‌ونقل و... که این نوع عدم قطعیت بر پارامترهای مدل تصمیم‌گیری تأثیر می‌گذارد؛ ۲. اختلال^۲ که ریسک مربوط به ازکارافتادن تسهیلات را به‌دنبال دارد.



شکل ۱. ماتریس برنامه‌ریزی زنجیره تأمین [۱]

رویکردهای متفاوتی برای مواجهه با عدم قطعیت پارامترهای مدل استفاده می‌شوند که مرسوم‌ترین آن‌ها عبارت‌اند از برنامه‌ریزی تصادفی و برنامه‌ریزی امکانی. اما موضوع مهم در مواجهه با عدم قطعیت معمول کسب‌وکار، یافتن راهکاری است که به‌ازای تمام حالات ممکن پارامترهای دارای عدم قطعیت استوار باقی بماند؛ یعنی راه‌حل ارائه شده نسبت به عدم قطعیت محیط تاب آورد و عملکرد ناشی از آن حداقل نوسان را داشته باشد. در نتیجه، هدف از طراحی استوار^۳ شبکه زنجیره تأمین توسعه مدل‌هایی است که در مواجهه با حالت‌های مختلف پارامترهای دارای عدم قطعیت به‌صورتی کارا عمل کند.

اشنایدر [۴] ادبیات موجود در مسائل مکان‌یابی را تحت عدم قطعیت مرور کرد. وی مفهوم استواری را تشریح کرده و شاخص‌های استواری مختلفی را در زمینه مکان‌یابی تسهیلات توصیف کرده است. پن و نگی [۵] مسئله طراحی شبکه زنجیره تأمین با تقاضای غیرقطعی را در یک سیستم تولیدی چابک بررسی کردند و یک مدل استوار تصادفی مبتنی بر سناریو را برای مواجهه با عدم قطعیت تقاضا و تغییرات هزینه حاصل از آن توسعه دادند. پیشوایی و همکاران [۶] رویکرد بهینه‌سازی استوار را برای مدل‌سازی مسئله طراحی شبکه زنجیره تأمین حلقه بسته اتخاذ کردند که در آن محصولات بازگشتی، تقاضا برای کالاهای

برآورد تقاضاست که روش‌های مختلف حمل‌ونقل با توجه به زمان تدارک خود موجب ارضای این محدودیت می‌شوند. شایان ذکر است تقاضای مراکز مشتریان و همچنین زمان مورد انتظار آن‌ها در برآورد این تقاضا در دوره‌های زمانی متفاوت، مقادیر مختلفی دارد.

این پژوهش نوآوری دیگری نیز از نظر تئوری دارد و آن هم مدل کردن هم‌زمان الزامات منعطف مشتری و عدم قطعیت پارامترهای مدل است. بدین‌منظور، رویکرد جدیدی با به‌کارگیری مدل‌های برنامه‌ریزی فازی-منعطف ترکیبی و برنامه‌ریزی امکانی استوار توسعه داده شده است. جدول ۱ نوآوری‌ها و تفاوت‌های اصلی این پژوهش را با ادبیات موجود به‌طور شفاف‌تری به تصویر کشیده است.

در ادامه، به تعریف جامع و مدل‌سازی مسئله پرداخته و رویکرد برنامه‌ریزی فازی-احتمالی توسعه‌داده‌شده ارائه می‌شود. سپس مدل پیشنهادی براساس داده‌های مستخرج از یک مطالعه موردی پیاده‌سازی و نتایج محاسباتی آن گزارش بیان می‌شود. در انتها، نتیجه‌گیری و پیشنهادهایی برای پژوهش‌های آتی بیان می‌شود.

تعریف مسئله

شبکه زنجیره تأمین بررسی شده در این پژوهش مبتنی بر مطالعه موردی مربوط به یک شرکت ایرانی تولیدکننده سرنگ و سرسوزن پزشکی است که نقش مهمی در عملکرد نظام سلامت کشور ایفا می‌کند. تولیدکننده هم‌اکنون یک کارخانه تولیدی با بیشترین سهم در بازار ایران دارد. در سال‌های اخیر، سفارشات در حال رشد تعدادی از مشتریان که پراکندگی جغرافیایی شایان‌توجهی نیز دارند، به برآوردنشان کامل تقاضای آن‌ها منجر شده است. در نتیجه، شبکه زنجیره تأمین موجود برای پاسخگویی به تقاضاهای جدید به طراحی مجدد نیاز دارد. به‌علت ماهیت محصول تولیدشده که با سلامت انسان‌ها سروکار دارد، در نظر گرفتن قابلیت اطمینان در برآورد الزامات مشتری همچون تقاضا و زمان مورد انتظار وی در برآورد این تقاضا اهمیت زیادی دارد. بدین‌منظور، دو نوع تسهیل آسیب‌پذیر و آسیب‌ناپذیر در راه‌اندازی مراکز تولید و توزیع در نظر گرفته شده است، به‌طوری‌که مراکز آسیب‌پذیر در معرض وقوع اختلالات احتمالی هستند و در صورت وقوع اختلال ممکن است

بنابراین، شبکه زنجیره تأمین طراحی شده باید در مقابل عدم قطعیت مربوط به پارامترهای مدل، استوار و در مواجهه با وقوع اختلال و ازکارافتادگی یا شکست تسهیلات، پایا (قابل اطمینان) باشد [۹]. علی‌رغم اهمیت طراحی مدلی جامع برای بررسی هم‌زمان عدم قطعیت مربوط به پارامترهای مدل و عدم قطعیت ناشی از وقوع اختلال و ازکارافتادن تسهیلات، طبق جدول ۱ پژوهش‌های کمی در ادبیات زنجیره تأمین هر دو نوع عدم قطعیت را در طراحی شبکه لحاظ کرده‌اند. در پژوهش حاضر، یک مدل برنامه‌ریزی فازی-احتمالی استوار برای طراحی پایای یک شبکه زنجیره تأمین سه سطحی چنددوره‌ای ارائه شده است که در آن هر دو نوع عدم قطعیت مدنظر قرار گرفته است. برای لحاظ کردن قابلیت اطمینان در مدل و مواجهه با اختلال، دو نوع تسهیل در راه‌اندازی مراکز تولید و توزیع در نظر گرفته شده است. نوع اول تسهیلات با صرف هزینه‌های بیشتر و با به‌کارگیری طرح‌هایی همچون قراردادهای برون‌سپاری، مقاوم‌سازی فیزیکی و... در برابر وقوع اختلال محافظت شده‌اند و تسهیلات پایا یا آسیب‌ناپذیر نام دارند. نوع دیگر تسهیلات که امکان مقاوم‌سازی برای آن‌ها فراهم نیست، تسهیلات غیرپایا یا آسیب‌پذیر نام دارند که وقوع اختلال در آن‌ها به‌صورت احتمالی و با احتمالات متفاوت تعریف شده است. چوپرا و همکاران [۲۱] در پژوهش خود بررسی کرده‌اند که استفاده از تسهیلات پایا و آسیب‌ناپذیر در برابر وقوع اختلال (حتی با هزینه‌ای بالاتر) ممکن است در مقابله با ریسک‌های ناشی از آن ارزشمند و اثربخش باشد.

برآورده‌ساختن تقاضای مشتریان و پاسخگویی به نیاز آن‌ها در زمان درست، با کیفیت و کمیت درست و با کمترین هزینه از عوامل کلیدی در موفقیت یک زنجیره تأمین محسوب می‌شود که ساختار شبکه زنجیره تأمین نقش شایان‌توجهی در دستیابی به مقادیر مطلوب این عوامل دارد [۳۳]. در نتیجه، تحقق زمان مورد انتظار مشتری در برآورد تقاضا موضوع مهم دیگری است که در ادبیات طراحی پایای شبکه زنجیره تأمین از آن غفلت شده است. همچنین، زمان یکی از عناصر اصلی در تعریف قابلیت اطمینان یک سیستم محسوب می‌شود. نوآوری دیگر این پژوهش لحاظ کردن محدودیت زمان مورد انتظار مشتری در

$I = NFP \cup FP$
 NFP مجموعه مکان‌های بالقوه مراکز تولید آسیب‌ناپذیر
 FP مجموعه مکان‌های بالقوه مراکز تولید آسیب‌پذیر
 J مجموعه مکان‌های بالقوه مراکز توزیع، $j \in J$
 $J = NFD \cup FD$
 NFD مجموعه مکان‌های بالقوه مراکز توزیع آسیب‌ناپذیر
 FD مجموعه مکان‌های بالقوه مراکز توزیع آسیب‌پذیر
 K مجموعه مکان‌های ثابت مراکز مشتریان، $k \in K$
 M مجموعه روش‌های حمل‌ونقل در دسترس،
 $m \in M$
 T مجموعه دوره‌های زمانی مورد بررسی، $t \in T$

پارامترها

\bar{f}_i هزینه ثابت احداث مرکز تولید در مکان i
 \bar{g}_j هزینه ثابت احداث مرکز توزیع در مکان j
 \bar{c}_{ij}^m تمام هزینه‌های جابه‌جایی یک واحد محصول از مرکز تولید i به مرکز توزیع j با روش حمل‌ونقل نوع m
 \bar{q}_{jk}^m تمام هزینه‌های جابه‌جایی یک واحد محصول از مرکز توزیع j به مرکز مشتری k با روش حمل‌ونقل نوع m
 \bar{w}_i هزینه تولید هر واحد محصول در مرکز تولید i
 \bar{d}_k^t مقدار تقاضای مرکز مشتری k در دوره زمانی t
 \bar{l}_i حداکثر ظرفیت تولید مرکز تولید i در هر دوره

زمانی

\bar{r}_j حداکثر ظرفیت توزیع مرکز توزیع j در هر دوره

زمانی

\hat{p}_i پارامتر تعیین‌کننده وقوع اختلال در مرکز تولید

آسیب‌پذیر i که دارای توزیع برنولی با پارامتر π_i است.

\hat{n}_j پارامتر تعیین‌کننده وقوع اختلال در مرکز توزیع

آسیب‌پذیر j که دارای توزیع برنولی با پارامتر γ_j است.

\bar{a}_i^t کسری از ظرفیت خدمت‌دهی مرکز تولید

آسیب‌پذیر i که در دوره زمانی t به دلیل اختلال از بین

رفته است که پارامتری غیرقطعی در بازه $[0, 1]$ است.

\bar{o}_j^t کسری از ظرفیت خدمت‌دهی مرکز توزیع

آسیب‌پذیر j که در دوره زمانی t به دلیل اختلال از بین

رفته است که پارامتری غیرقطعی در بازه $[0, 1]$ است.

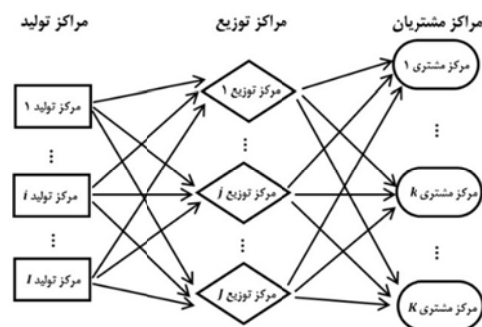
\bar{r}_{ij}^m زمان تولید و تدارک محصول از مرکز تولید i به

مرکز توزیع j با روش حمل‌ونقل نوع m

\bar{p}_{jk}^m زمان تدارک محصول از مرکز توزیع j به مرکز

مشتری k با روش حمل‌ونقل نوع m

بخشی از ظرفیت خدمت‌دهی خود را به صورت غیرقطعی از دست بدهند. ساختار شبکه زنجیره تأمین مورد مطالعه در شکل ۲ مشاهده می‌شود که یک شبکه زنجیره تأمین چندسطحی تک‌محصولی چنددوره‌ای است و از سه سطح مراکز تولید، مراکز توزیع و مراکز مشتریان تشکیل شده است. محصول جدیدی که مراکز تولید مختلف برای برآورد تقاضای هر مرکز مشتری تولید می‌کنند از طریق یک یا چند مرکز توزیع و با روش‌های حمل‌ونقل مختلف حمل می‌شود. چندین مرکز بالقوه (آسیب‌پذیر و آسیب‌ناپذیر) برای راه‌اندازی مراکز تولید و توزیع با ظرفیت محدود وجود دارد. ظرفیت این مراکز از قبل، اما به صورت غیرقطعی، مشخص است و به تصمیم‌گیری در خصوص آن‌ها نیازی نیست. مکان مشتریان ثابت و از پیش تعیین شده است و تقاضای آن‌ها در زمان مورد انتظارشان و به طور کامل باید برآورده شود. تقاضای مشتریان و زمان مورد انتظار آن‌ها برای برآورد تقاضا در دوره‌های زمانی مختلف مقادیر متفاوتی دارد. محدودیت مربوط به زمان مورد انتظار مشتری یک محدودیت سخت و محکم نیست و ممکن است تا حدی نقض شود که در نتیجه آن مطلوبیت مشتری کاهش می‌یابد.



شکل ۲. ساختار شبکه زنجیره تأمین مورد مطالعه

مدل‌سازی مسئله

مجموعه اندیس‌ها، پارامترها و متغیرهای تصمیم برای مدل‌سازی مسئله طراحی پایای شبکه زنجیره تأمین عبارت‌اند از:

مجموعه‌ها و اندیس‌ها

I مجموعه مکان‌های بالقوه مراکز تولید، $i \in I$

s. t.

$$\sum_j \sum_m u_{jk}^{mt} \geq \tilde{d}_k^t, \quad \forall k, t, \quad (2)$$

$$\sum_i \sum_m x_{ij}^{mt} - \sum_k \sum_m u_{jk}^{mt} = 0, \quad \forall j, t, \quad (3)$$

$$\sum_j \sum_m x_{ij}^{mt} \leq \tilde{l}_i y_i, \quad \forall i \in NFP, t, \quad (4)$$

$$\sum_j \sum_m x_{ij}^{mt} \leq (1 - \hat{p}_i \tilde{\alpha}_i^t) \tilde{l}_i y_i, \quad \forall i \in FP, t, \quad (5)$$

$$\sum_k \sum_m u_{jk}^{mt} \leq \tilde{r}_j v_j, \quad \forall j \in NFD, t, \quad (6)$$

$$\sum_k \sum_m u_{jk}^{mt} \leq (1 - \hat{n}_j \tilde{\delta}_j^t) \tilde{r}_j v_j, \quad \forall j \in FD, t, \quad (7)$$

$$x_{ij}^{mt} \leq M b_{ij}^{mt}, \quad \forall i, j, m, t, \quad (8)$$

$$u_{jk}^{mt} \leq M h_{jk}^{mt}, \quad \forall j, k, m, t, \quad (9)$$

$$\tilde{\tau}_{ij}^m b_{ij}^{mt} + \tilde{\rho}_{jk}^m h_{jk}^{mt} \leq e_k^t, \quad \forall i, j, k, m, t, \quad (10)$$

$$x_{ij}^{mt}, u_{jk}^{mt} \geq 0, \quad \forall i, j, k, m, t, \quad (11)$$

$$y_i, v_j \in \{0,1\}, \quad \forall i, j, \quad (12)$$

$$b_{ij}^{mt}, h_{jk}^{mt} \in \{0,1\}, \quad \forall i, j, k, m, t. \quad (13)$$

تابع هدف مدل هزینه‌های مربوط به استقرار مراکز تولید و توزیع و همچنین مجموع هزینه‌های تولید و حمل‌ونقل محصولات را در دوره‌های زمانی مختلف حداقل می‌سازد. در محدودیت ۲ ضروری است تقاضای تمام مراکز مشتریان در هر دوره زمانی به‌طور کامل برآورده شود. عبارت ۳ محدودیت مربوط به تعادل جریان در مراکز توزیع را تضمین می‌کند. عبارات ۴ تا ۷ محدودیت به ظرفیت

e_k^t زمان مورد انتظار برآورده‌شدن تقاضا برای مرکز مشتری k در دوره زمانی t

\tilde{l}_k^t حد آستانه‌ای مجاز برای نقض محدودیت زمان مورد انتظار برآورد تقاضا برای مرکز مشتری k در دوره زمانی t

متغیرهای تصمیم

y_i مساوی ۱ اگر مرکز تولید در مکان i احداث شود و مساوی ۰ در غیر این صورت

v_j مساوی ۱ اگر مرکز توزیع در مکان j احداث شود و مساوی ۰ در غیر این صورت

x_{ij}^{mt} مقدار محصول جریان‌یافته از مرکز تولید i به مرکز توزیع j با روش حمل‌ونقل نوع m در دوره زمانی t

u_{jk}^{mt} مقدار محصول جریان‌یافته از مرکز توزیع j به مرکز مشتری k با روش حمل‌ونقل نوع m در دوره زمانی t

b_{ij}^{mt} مساوی ۱ اگر محصولی از مرکز تولید i به مرکز توزیع j با روش حمل‌ونقل نوع m در دوره زمانی t جریان یابد و مساوی ۰ در غیر این صورت

h_{jk}^{mt} مساوی ۱ اگر محصولی از مرکز توزیع j به مرکز مشتری k با روش حمل‌ونقل نوع m در دوره زمانی t جریان یابد و مساوی ۰ در غیر این صورت

شایان ذکر است پارامترهای دارای عدم قطعیت معمول کسب‌وکار با نماد تیلدا (\tilde{n}) مشخص شده‌اند که به دلیل حد بالای عدم قطعیت و در دسترس نبودن داده‌های تاریخی کافی و قابل‌اتکا با توزیع امکانی مدل‌سازی می‌شوند و همچنین پارامترهای تعیین‌کننده وقوع اختلال در مراکز آسیب‌پذیر با نماد هت (\hat{n}) مشخص شده‌اند که از توزیع احتمالی برنولی پیروی می‌کنند. با توجه به نمادهای ارائه‌شده، مدل ریاضی طراحی پایای شبکه زنجیره تأمین به‌صورت زیر ارائه می‌شود:

$$\begin{aligned} \text{Min } Z = & \sum_i \tilde{f}_i y_i + \sum_j \tilde{g}_j v_j \\ & + \sum_i \sum_j \sum_m \sum_t (\tilde{w}_i + \tilde{c}_{ij}^m) x_{ij}^{mt} \\ & + \sum_j \sum_k \sum_m \sum_t \tilde{q}_{jk}^m u_{jk}^{mt} \end{aligned} \quad (1)$$

برنامه‌ریزی فازی-احتمالی استوار

برنامه‌ریزی استوار یک رویکرد ریسک‌گریز برای برخورد با مسائل بهینه‌سازی در شرایط عدم قطعیت است. به‌عنوان پژوهش پیش‌تاز در این عرصه، سویستر [۳۴] یک روش برنامه‌ریزی استوار بدبینانه برای برخورد با مسائل برنامه‌ریزی خطی غیردقیق توسعه داد. سال‌ها بعد، مولوی و همکاران [۳۵] یک روش برنامه‌ریزی استوار برای مسائل برنامه‌ریزی مبتنی بر سناریو توسعه دادند. در ادامه، بن-تال و نیرووسکی [۳۶-۳۸]، ال‌قووی و همکاران [۳۹] و برتسیماس و سیم [۴۰، ۴۱] با توسعه روش سویستر گام مهمی در توسعه این رویکرد برداشتند. در سال‌های اخیر نیز پژوهش پیشوایی و همکاران [۷] موج جدیدی از مدل‌های استوار را ایجاد کرد که با توسعه منطق استواری در فضای برنامه‌ریزی امکانی رویکرد جدیدی به‌نام برنامه‌ریزی امکانی استوار ارائه دادند. یک جواب برای یک مسئله بهینه‌سازی، یک جواب استوار است اگر دارای استواری شدنی بودن و استواری بهینگی باشد. استواری شدنی بودن به این معناست که جواب باید برای تمام یا بیشتر حالات ممکن پارامترهای دارای عدم قطعیت شدنی باقی بماند. استواری بهینگی نیز یعنی اینکه مقدار تابع هدف به‌ازای جواب استوار باید برای تمام یا بیشتر پارامترهای دارای عدم قطعیت، نزدیک به مقدار بهینه باشد یا حداقل انحراف را از مقدار بهینه خود داشته باشد. رویکردهای بهینه‌سازی استوار به سه دسته کلی تقسیم می‌شود [۷]:

- رویکرد بدبینانه سخت: این رویکرد حداکثر ایمنی را در مواجهه با عدم قطعیت ایجاد می‌کند. از بعد استواری شدنی بودن تضمین می‌کند که جواب به‌ازای تمام مقادیر ممکن پارامتر دارای عدم قطعیت، شدنی باقی می‌ماند و از بعد استواری بهینگی به‌دنبال بهینه‌ساختن بدترین حالت ممکن (منطق $Min - Max$) است.
- رویکرد بدبینانه نرم: این رویکرد نسخه منعطف‌تر رویکرد بدبینانه سخت است که همچنان به‌دنبال بهینه‌ساختن بدترین مقدار تابع هدف است، اما درصدی از رضای تمام محدودیت‌ها در بدترین حالت ممکن نیست.
- رویکرد واقع‌گرایانه: در این رویکرد یک موازنه منطقی بین هزینه استواری و دیگر اهداف مسئله (همچون

مراکز تولید و توزیع آسیب‌ناپذیر و آسیب‌پذیر مربوط هستند. این محدودیت‌ها از تخصیص جریان به تسهیلات بازنشده جلوگیری می‌کند. به‌علاوه، محدودیت ۵ و ۷ تضمین می‌کند که اگر مراکز آسیب‌پذیر در صورت وقوع اختلال دچار شکست شوند، تخصیص جریان تنها به‌اندازه ظرفیت باقیمانده آن‌ها صورت می‌پذیرد. محدودیت‌های ۸ تا ۱۰ تضمین می‌کند که تقاضای مراکز مشتریان در هر دوره زمانی باید در زمان مورد انتظار آن‌ها برآورده شود؛ به‌عبارت دیگر، این محدودیت‌ها تعیین می‌کنند که محصول مورد تقاضای مراکز مشتریان از کدام تسهیلات و از طریق کدام روش حمل‌ونقل جریان یابند تا با توجه به زمان تهیه و تدارکشان زمان مورد انتظار مراکز مشتریان را در برآورد تقاضا ارضا کنند. پارامتر M در محدودیت‌های ۸ و ۹ یک عدد به‌اندازه کافی بزرگ است؛ یک مقدار مناسب برای پارامتر M می‌تواند حداکثر تقاضای مراکز مشتریان باشد. زمان مورد انتظار مراکز مشتریان در برآورد تقاضا یک محدودیت منعطف است و می‌تواند نقض محدودیت را تا یک حد آستانه‌ای تحمل کند که با کاهش مطلوبیت وی همراه است. در نتیجه، در محدودیت ۱۰ علامت \leq نسخه منعطف علامت \leq است و ممکن است «تقریباً کوچک‌تر از» تعریف شود. در نهایت، عبارات ۱۱ تا ۱۳ محدودیت‌های مربوط به نوع متغیرهای تصمیم مسئله و نشان‌دهنده نامنفی یا صفر و یک بودن آن‌ها هستند.

شایان ذکر است برای مدل‌سازی اختلال در مدل توسعه‌داده‌شده، با تعریف پارامترهای احتمالی تعیین‌کننده وقوع اختلال در مراکز آسیب‌پذیر (بدون توجه به پارامترهای امکانی مسئله در این مرحله) یک مدل پایه برنامه‌ریزی تصادفی ارائه شده است که از رویکردهای متفاوتی برای مواجهه با آن استفاده می‌شود. نمونه‌ای از این رویکردها عبارت‌اند از: تعریف سناریوهای مختلف وقوع اختلال به‌طوری‌که در هر سناریو این پارامتر برای برخی از مراکز آسیب‌پذیر دارای مقدار ۱ (وقوع اختلال در آن مراکز) و برای برخی دیگر دارای مقدار ۰ (عدم وقوع اختلال در آن مراکز) است، روش برنامه‌ریزی با محدودیت‌های شانس احتمالی، استفاده از رویکرد بدبینانه سخت و

زمان مورد انتظار مشتریان در برآورد تقاضا در دوره‌های زمانی مختلف هستند. همچنین، بردار \bar{a} کسری از ظرفیت باقیمانده تسهیلات بعد از وقوع شکست را به واسطه اختلال در دوره‌های زمانی مختلف تعیین می‌کند. شایان ذکر است مقادیر این بردار برای تسهیلات آسیب‌پذیر مقداری غیرقطعی در بازه $[0, 1]$ و برای تسهیلات آسیب‌ناپذیر عدد قطعی ۱ است. ماتریس‌های A, B, D, \bar{N}, H, W و \bar{T} ماتریس‌های ضرایب محدودیت‌ها هستند. دو ماتریس با مقادیر غیرقطعی \bar{N} و \bar{T} ، ظرفیت تسهیلات و زمان تدارک محصول بین این تسهیلات را نشان می‌دهد. متغیرهای تصمیم صفر و یک مربوط به استقرار تسهیلات با y و برقراربودن جریان بین آن‌ها در هر دوره زمانی با b نشان داده شده است. همچنین، تمام متغیرهای نامنفی مربوط به جریان محصول در هر دوره زمانی با x تعیین می‌شود.

برنامه‌ریزی ریاضی فازی به دو دسته کلی طبقه‌بندی می‌شود: برنامه‌ریزی امکانی و برنامه‌ریزی منعطف. برنامه‌ریزی امکانی برای مدل‌سازی پارامترهای دارای عدم قطعیت شناختی (گنگ) مسئله با استفاده از توزیع امکان استفاده می‌شود. این توزیع با استفاده از داده‌های عینی - و اغلب غیرکافی - موجود و تجربه یا دانش ذهنی خبره به دست می‌آید [۴۲]. اما برنامه‌ریزی منعطف برای مواجهه با ابهام تصمیم‌گیرنده در سطح ارضای محدودیت‌ها و اهداف مسئله به کار می‌رود که با استفاده از مجموعه‌های فازی ذهنی مبتنی بر مطلوبیت (ترجیح) تصمیم‌گیرنده مدل‌سازی می‌شود [۴۳]. از آنجاکه در مسئله مورد مطالعه، از یک طرف پارامترهای معمول کسب‌وکار به دلیل نبود داده‌های تاریخی کافی و قابل‌اتکا دارای عدم قطعیت شناختی هستند و از طرف دیگر محدودیت زمان مورد انتظار مشتری در برآورد تقاضا یک الزام منعطف است، این مسئله به هر دو دسته تعلق دارد. در نتیجه، یک مدل امکانی - منعطف ترکیبی برای بررسی هم‌زمان انعطاف‌پذیری محدودیت‌ها و عدم قطعیت پارامترها باید توسعه یابد.

مواجهه با مسئله بهینه‌سازی دارای ترکیبی از ابهام در محدودیت‌ها و گنگی در پارامترها چالشی است که در پژوهش لودویک و جمیسون [۴۴] بررسی شده است. چندین مدل برای مسائل امکانی - منعطف ترکیبی در

متوسط عملکرد سیستم) ایجاد می‌شود. از بعد استواری شدنی بودن امکان نقض برخی از محدودیت‌ها فراهم شده اما جریمه ناشی از این نقض نیز پذیرفته می‌شود. جواب حاصل از این روش موجه و نزدیک به مقدار بهینه برای اکثر حالات ممکن پارامترهای غیرقطعی است.

در ادامه، به منظور توسعه روش برنامه‌ریزی فازی - احتمالی استوار برای مسئله طراحی پایای شبکه زنجیره تأمین مورد بررسی، ابتدا پارامترهای احتمالی مسئله با یک رویکرد برنامه‌ریزی استوار مطالعه می‌شود و سپس با توسعه یک روش برنامه‌ریزی فازی استوار به مدل‌سازی هم‌زمان محدودیت‌های شانس با پارامترهای امکانی و محدودیت منعطف مسئله پرداخته می‌شود.

برای مواجهه با پارامترهای برنولی نشان‌دهنده وقوع شکست در شرایط اختلال، با توجه به ماهیت زنجیره تأمین مورد مطالعه از یک رویکرد بدبینانه سخت استفاده شده است، به طوری که تضمین شود جواب به‌ازای بدترین مقدار این پارامترها - که نشان‌دهنده وقوع شکست است - همچنان شدنی باقی می‌ماند. در نتیجه، مسئله طراحی پایای شبکه زنجیره تأمین به منظور توسعه استواری آن به صورت زیر مدل‌سازی می‌شود:

$$\text{Min Max}_{\{\bar{p}_i, \bar{n}_j | \forall i \in FP, j \in FD\}} Z$$

s. t.

$$(14) \quad (13) - (2)$$

از مزیت‌های این مدل می‌توان به بی‌نیازی به دانستن احتمال شکست تسهیلات آسیب‌پذیر اشاره کرد، زیرا در واقعیت تخمین احتمال شکست بسیار مشکل است. فرم‌برداری مسئله فوق به منظور نمایش ساده‌تر آن در ادامه پژوهش به صورت زیر فرموله می‌شود:

$$\text{Min } Z = \bar{f}y + \bar{c}x$$

s. t.

$$Ax \geq \bar{d}$$

$$Bx = 0$$

$$Dx \leq \bar{a}\bar{N}y$$

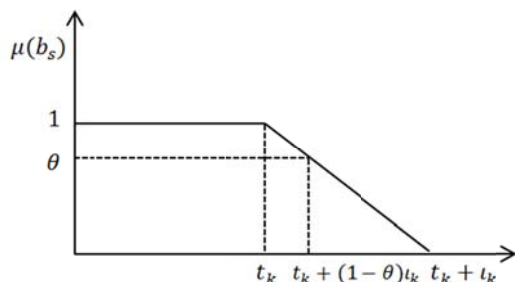
$$Hx \leq MWb$$

$$\bar{T}b \leq e$$

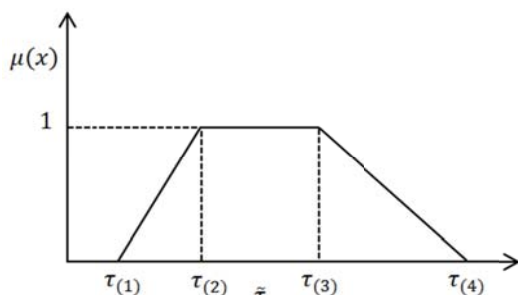
$$x \geq 0, \quad y, b \in \{0, 1\} \quad (15)$$

که در آن بردارهای \bar{f} و \bar{c} به ترتیب مربوط به هزینه‌های ثابت استقرار تسهیلات و هزینه‌های متغیر تولید و حمل‌ونقل و بردارهای \bar{d} و e به ترتیب نشان‌دهنده تقاضا و

اصلی شبکه زنجیره تأمین پایا برآورد الزامات مشتری در هر دو وضعیت نرمال و وقوع اختلال است، از پیمانۀ الزام برای مدل‌سازی محدودیت‌های شانسی و همچنین از عملگر مقدار انتظاری برای مدل کردن تابع هدف استفاده شده است.



شکل ۳. محدودیت منعطف زمان مورد انتظار مشتری



شکل ۴. توزیع امکان ذوزنقه‌ای برای پارامتر فازی $\bar{\tau}$

در نتیجه، مدل برنامه‌ریزی با محدودیت‌های شانسی برای مسئله مورد مطالعه (۱۵) به صورت زیر فرموله می‌شود:

$$\text{Min } E[Z] = E[\bar{f}]y + E[\bar{c}]x$$

s. t.

$$\text{Nes}\{Ax \geq \bar{d}\} \geq \alpha,$$

$$Bx = 0,$$

$$\text{Nes}\{Dx \leq \bar{a}\bar{N}y\} \geq \beta,$$

$$Hx \leq M Wb,$$

$$\text{Nes}\{\bar{T}b \leq e + (1 - \theta)t\} \geq \gamma,$$

$$x \geq 0, \quad y, b \in \{0,1\}. \quad (18)$$

α ، β و γ بیانگر حداقل سطح اطمینان ارضای محدودیت‌های شانسی با پارامترهای امکانی هستند. برخلاف θ که بیانگر مطلوبیت جواب است، این مقادیر در واقع امکان ارضای محدودیت‌های شانسی را مشخص می‌کنند.

ادبیات وجود دارد که به عنوان یکی از مدل‌های پایه‌ای در این زمینه می‌توان به پژوهش دلگادو و همکاران [۴۵] اشاره کرد. در این مدل‌ها جواب مسئله به نحوی به دست می‌آید که در آن انعطاف‌پذیری و اطمینان ارضای محدودیت‌های دارای عدم قطعیت در یک سطح ارضا می‌شوند، در حالی که سطح ارضای محدودیت و امکان ارضای آن دو مفهوم کاملاً مجزا هستند [۴۶]. آنتی‌یت [۴۶] یک مدل برنامه‌ریزی امکانی- منعطف ترکیبی برای یافتن سطح ارضای محدودیت‌های منعطف و سطح اطمینان ارضای محدودیت‌های شانسی (محدودیت دارای پارامتر امکانی) از طریق ایجاد یک توازن بین آن‌ها توسعه داد. در پژوهش حاضر از روش‌های برنامه‌ریزی با محدودیت‌های شانسی [۴۷]، برنامه‌ریزی فازی وردگی^۵ [۴۵،۴۳] و برنامه‌ریزی امکانی استوار [۷] برای توسعه رویکرد جدید برنامه‌ریزی امکانی- منعطف استوار استفاده شده است. در ابتدا محدودیت منعطف زمان مورد انتظار مرکز مشتری k (بدون توجه به پارامترهای امکانی در این مرحله) مطابق با روش وردگی با استفاده از یک مجموعه فازی مبتنی بر مطلوبیت مدل‌سازی می‌شود که تابع عضویت آن به صورت زیر است:

$$\mu_k(b) = \begin{cases} 1, & (Tb)_k \leq e_k \\ \frac{e_k + t_k - (Tb)_k}{t_k}, & e_k \leq (Tb)_k \leq e_k + t_k \\ 0, & (Tb)_k \geq e_k + t_k \end{cases} \quad (16)$$

این تابع عضویت بیان می‌کند مرکز مشتری k نقض محدودیت منعطف را تا مقدار $e_k + t_k$ با یک مطلوبیت کاهشی (شکل ۳) تحمل می‌کند.

فرض کنید θ بیانگر حداقل سطح ارضای محدودیت منعطف است- در واقع تعیین‌کننده مطلوبیت جواب است- که بر مبنای روش وردگی، محدودیت منعطف مسئله به صورت زیر نوشته می‌شود:

$$Tb \leq e + (1 - \theta)t \quad (17)$$

حال برای مواجهه با پارامترهای غیرقطعی مسئله ۱۵، مدل برنامه‌ریزی با محدودیت‌های شانسی امکانی به کار گرفته شده است. برای نمایش پارامترهای غیرقطعی در مدل ارائه شده از توزیع امکان ذوزنقه‌ای استفاده شده که در شکل ۴ به تصویر کشیده می‌شود. از آنجاکه رسالت

ارائه کردند. این رویکرد در پژوهش حاضر به صورت زیر توسعه داده شده است تا توانایی مواجهه با هر دو نوع محدودیت شانس و منعطف را داشته باشد.

$$\begin{aligned} & Min E[Z] + \eta(Z_{max} - E[Z]) \\ & + \delta[d_{(4)} - (1 - \alpha)d_{(3)} - \alpha d_{(4)}] \\ & + \varphi[\beta a_{(1)}N_{(1)} + (1 - \beta)a_{(2)}N_{(2)} - a_{(1)}N_{(1)}]y \\ & + \psi_{ch}[T_{(4)} - (1 - \gamma)T_{(3)} - \gamma T_{(4)}]b \\ & + \psi_{fl}[(1 - \theta)t] \end{aligned}$$

s. t.

$$\begin{aligned} Ax & \geq (1 - \alpha)d_{(3)} + \alpha d_{(4)}, \\ Bx & = 0, \\ Dx & \leq [(1 - \beta)a_{(2)}N_{(2)} + \beta a_{(1)}N_{(1)}]y, \\ Hx & \leq M Wb, \\ [(1 - \gamma)T_{(3)} + \gamma T_{(4)}]b & \leq e + (1 - \theta)t, \\ x & \geq 0, \quad y, b \in \{0,1\}, \\ 0.5 < \alpha, \beta, \gamma & \leq 1, \quad 0 < \theta \leq 1. \end{aligned} \quad (20)$$

مشابه با مدل برنامه ریزی با محدودیت‌های شانس امکانی، اولین عبارت تابع هدف مدل ارائه شده نیز به حداقل سازی متوسط هزینه کل می پردازد. عبارت دوم تابع هدف به استواری بهینگی مربوط است که اختلاف بین حداکثر مقدار ممکن تابع هدف (Z_{max}) و متوسط مقدار آن را با درجه اهمیت η حداقل می سازد. در واقع، ممکن است این عبارت معیاری برای تغییرپذیری تابع هدف با پارامترهای غیرقطعی تفسیر شود. Z_{max} در این عبارت برابر است با:

$$Z_{max} = f_{(4)}y + c_{(4)}x \quad (21)$$

این مدل تضمین می کند که تابع هدف فقط به انحرافات مثبت (یعنی انحراف مربوط به مقادیر تابع هدف بیشتر از مقدار متوسط آن) حساس است، بدون آنکه انحرافات منفی را محدود کند، زیرا تحقق هزینه کل کمتر از مقدار متوسط آن برای تصمیم گیرنده مطلوب است. عبارات دیگر تابع هدف، استواری شدنی بودن جواب را کنترل می کنند که در آن عبارات سوم تا پنجم اختلاف بین بدترین مقدار پارامترهای غیرقطعی و مقدار انتخاب شده آن را در محدودیت‌های شانس حداقل می سازد. مقادیر δ ، φ و ψ_{ch} جریمه هر واحد نقض ممکن محدودیت‌های شانس

بر مبنای [۴۷، ۴۸]، معادل قطعی مدل (۱۸) به صورت زیر ارائه می شود:

$$\begin{aligned} Min E[Z] & = \left(\frac{f_{(1)} + f_{(2)} + f_{(3)} + f_{(4)}}{4} \right) y \\ & + \left(\frac{c_{(1)} + c_{(2)} + c_{(3)} + c_{(4)}}{4} \right) x \\ s. t. \\ Ax & \geq (1 - \alpha)d_{(3)} + \alpha d_{(4)}, \\ Bx & = 0, \\ Dx & \leq [(1 - \beta)a_{(2)}N_{(2)} + \beta a_{(1)}N_{(1)}]y, \\ Hx & \leq M Wb, \\ [(1 - \gamma)T_{(3)} + \gamma T_{(4)}]b & \leq e + (1 - \theta)t, \\ x & \geq 0, \quad y, b \in \{0,1\}. \end{aligned} \quad (19)$$

در این مدل، تصمیم گیرنده باید حداقل سطح اطمینان محدودیت‌های شانس (مقادیر α ، β و γ) و همچنین حداقل سطح رضای محدودیت منعطف (θ) را در یک رویه تعاملی تعیین کند؛ یعنی ابتدا مقادیر اولیه‌ای را به طور ذهنی برای هر یک تعیین کند و سپس تا رسیدن به مقادیر مطلوب به اصلاح آن‌ها پردازد. این روش مشابه آنالیز حساسیت است، زیرا تصمیم گیرنده مقادیر این پارامترها را تغییر می دهد و اثر آن را روی خروجی مدل تحلیل می کند. با وجود این، روش مذکور معایبی دارد که مهم ترین آن‌ها عبارتند از:

- تضمینی برای بهینگی مقادیر نهایی سطوح اطمینان محدودیت‌های شانس و سطح رضای محدودیت منعطف وجود ندارد، زیرا این مقادیر به طور ذهنی تعیین شده اند.
 - با افزایش تعداد محدودیت‌های شانس و منعطف، تعداد آزمایش‌ها برای تعیین مقدار مناسب سطوح اطمینان و رضای محدودیت‌ها به طور چشمگیری افزایش می یابد.
 - به انحرافات ممکن از محدودیت‌های شانس و در نتیجه غیرموجه شدن جواب توجه نشده است و ممکن است موجب تحمیل هزینه‌های بسیاری شود.
 - این مدل نسبت به انحرافات تابع هدف از مقدار مورد انتظار آن حساس نیست. این امر گاهی به تحمیل ریسک زیادی به تصمیم گیرنده منجر می شود.
- برای رفع این معایب، پیشوایی و همکاران [۷] مفهوم بهینه سازی امکانی استوار را معرفی و چندین نسخه از آن را

حمل و نقل شامل کامیون‌های شش تنی و نه تنی برای ارسال محصولات به مراکز مشتریان بین گره‌های شبکه استفاده می‌شود. با توجه به سفارشات در حال رشد مراکز جدید مشتریان در سال‌های اخیر، داده‌های تاریخی کافی و قابل اتکا برای تقاضای مراکز مشتریان و سایر پارامترهای مسئله در دسترس نیست. در نتیجه، این پارامترها با توزیع امکانی مدل‌سازی شده و برای تخمین آن‌ها از نظر یک تیم خبره و داده‌های موجود در سازمان بهره گرفته شده است. نمایش تمام پارامترهای مسئله به دلیل محدودیت فضا در پژوهش امکان‌پذیر نیست، اما برای نمونه تعدادی از آن‌ها شامل هزینه ثابت راه‌اندازی و ظرفیت مراکز بالقوه تولید و توزیع در جدول‌های ۲ و ۳ نشان داده می‌شوند. سایر پارامترها نیز در صورت درخواست خوانندگان علاقه‌مند قابل ارائه است. به دلیل اهمیت زنجیره تأمین مورد مطالعه در نظام سلامت کشور، در نظر گرفتن قابلیت اطمینان در برآورد الزامات مشتری حتی در صورت وقوع اختلال اهمیت زیادی دارد. بدین منظور، برخی از مراکز بالقوه تولید و توزیع با صرف هزینه‌های بیشتر تا حد ممکن از وقوع شکست محافظت شده‌اند، اما همچنان مکان‌های بالقوه آسیب‌پذیری وجود دارند که امکان مقاومت‌سازی برای آن‌ها وجود ندارد. این مکان‌های آسیب‌پذیر برای مراکز تولید عبارت‌اند از آشتیان و ساوه و همچنین برای مراکز توزیع عبارت‌اند از ساوه و اراک که در صورت وقوع اختلالات احتمالی همچون خرابی تجهیزات، زلزله‌های با شدت نه چندان زیاد و... ممکن است بخشی از ظرفیت خود را از دست بدهند.

است که با توجه به ماهیت مسئله به‌درستی تعیین می‌شود؛ برای مثال، δ جریمه تقاضای ارضاننده تفسیر می‌شود. این عبارات به بهینه‌سازی سطوح اطمینان ارضای محدودیت‌های شانس- که به‌عنوان متغیر در مدل وارد شده‌اند- کمک می‌کند. عبارت آخر تابع هدف، اختلاف بین مطلوب‌ترین سطح ارضای محدودیت(های) منعطف و مقدار برگزیده آن را حداقل می‌سازد. پارامتر ψ_{fl} جریمه هر واحد نقص محدودیت منعطف است که مطلوبیت جواب را کاهش می‌دهد. از آنجا که γ و θ هر دو به یک محدودیت متعلق هستند، مقادیر مطلوب آن‌ها با ایجاد یک موازنه بین ψ_{ch} و ψ_{fl} تعیین می‌شود. پارامتر ψ_{ch} با ریسک مربوط به غیرموجه‌شدن مدل سروکار دارد و پارامتر ψ_{fl} به مطلوبیت جواب مربوط می‌شود.

ارزیابی و پیاده‌سازی مطالعه موردی

در این بخش، به‌منظور نمایش کاربردی بودن و ارزیابی کارایی مدل برنامه‌ریزی فازی-احتمالی استوار پیشنهادی، از مطالعه موردی یک شرکت ایرانی تولیدکننده سرنگ و سروسوزن پزشکی استفاده شده است که قبلاً در پژوهش پیشوایی و همکاران [۷] نیز مطالعه شده است. داده‌های مورد بررسی این شرکت به چهار دوره زمانی مربوط است که در هر دوره زمانی باید به تقاضای دوازده ناحیه از مراکز مشتریان پاسخ داده شود. این تولیدکننده هم‌اکنون یک مرکز تولید فعال دارد. همچنین، سه مرکز بالقوه دیگر برای راه‌اندازی مراکز تولید شناسایی شده‌اند. توزیع محصولات بین مشتریان باید از طریق مراکز توزیع انجام گیرد و ارسال مستقیم مجاز نیست. پنج مکان بالقوه برای راه‌اندازی مراکز توزیع در نظر گرفته شده‌اند و همچنین دو نوع روش

جدول ۲. هزینه ثابت راه‌اندازی و ظرفیت مراکز تولید بالقوه

مکان	هزینه ثابت (میلیون ریال)	ظرفیت (میلیون واحد)
(i)	$(f_{i(1)}, f_{i(2)}, f_{i(3)}, f_{i(4)})$	$(l_{i(1)}, l_{i(2)}, l_{i(3)}, l_{i(4)})$
۱. آشتیان	(۰ و ۰ و ۰ و ۰)	(۹۱۵ و ۸۹۵ و ۸۷۵ و ۸۶۰)
۲. ساوه	(۱۵۲۰۰۰ و ۱۴۸۰۰۰ و ۱۴۳۰۰۰ و ۱۳۵۰۰۰)	(۸۹۵ و ۸۷۰ و ۸۴۰ و ۸۲۵)
۳. سمنان	(۲۰۴۰۰۰ و ۱۹۵۰۰۰ و ۱۸۴۰۰۰ و ۱۷۸۰۰۰)	(۸۹۵ و ۸۷۰ و ۸۴۰ و ۸۲۵)
۴. ورامین	(۱۹۷۰۰۰ و ۱۹۰۰۰۰ و ۱۸۲۰۰۰ و ۱۷۳۰۰۰)	(۸۹۵ و ۸۷۰ و ۸۴۰ و ۸۲۵)

جدول ۳. هزینه ثابت راهاندازی و ظرفیت مراکز توزیع بالقوه

مکان (j)	هزینه ثابت (میلیون ریال) ($G_{j(1)}, G_{j(2)}, G_{j(3)}, G_{j(4)}$)	ظرفیت (میلیون واحد) ($T_{j(1)}, T_{j(2)}, T_{j(3)}, T_{j(4)}$)
۱. ورامین	(۲۳۰۰۰ و ۲۲۳۰۰ و ۲۲۰۰۰ و ۲۱۵۰۰)	(۹۴۵ و ۹۳۵ و ۹۲۵ و ۹۱۵)
۲. ساوه	(۱۷۴۰۰ و ۱۷۱۰۰ و ۱۶۹۰۰ و ۱۶۵۰۰)	(۹۴۰ و ۹۳۰ و ۹۲۰ و ۹۱۰)
۳. شاهرود	(۲۳۶۰۰ و ۲۳۴۰۰ و ۲۳۲۰۰ و ۲۳۰۰۰)	(۹۸۰ و ۹۷۲ و ۹۶۲ و ۹۵۵)
۴. اراک	(۲۱۴۰۰ و ۲۱۱۰۰ و ۲۰۸۰۰ و ۲۰۶۰۰)	(۹۳۵ و ۹۲۷ و ۹۱۸ و ۹۱۰)
۵. ارومیه	(۲۴۰۰۰ و ۲۳۷۵۰ و ۲۳۵۰۰ و ۲۳۰۰۰)	(۸۵۰ و ۸۴۶ و ۸۴۲ و ۸۳۰)

$$R^d, R^c, Re^{ch}, Re^{fl} \geq 0. \quad (22)$$

در مدل واقع‌نمایی، R^d, R^c, Re^{ch} و Re^{fl} متغیرهای تصمیمی هستند که نقض محدودیت‌های شانس و همچنین Re^{fl} متغیر تصمیمی است که مقدار بهینه نقض محدودیت منعطف مسئله را با توجه به جریمه اختصاص یافته به آن تعیین می‌کنند. میانگین و انحراف استاندارد مقادیر تابع هدف واقع‌نمایی‌های تصادفی به‌عنوان معیارهای عملکردی برای ارزیابی مدل‌های ارائه شده استفاده می‌شوند. به‌علاوه، از آنجاکه مدل ارائه شده فقط نسبت به انحرافات مثبت حساس است، معیار عملکردی جدیدی نیز با عنوان انحراف مثبت استاندارد معرفی شده است. برای تعیین این معیار فقط انحرافات مثبت از میانگین در محاسبه انحراف استاندارد قرار داده می‌شوند. نتایج این آزمایش‌ها در جدول ۴ و شکل ۵ ارائه می‌شود. نتایج نشان می‌دهد در میان مدل‌های بررسی شده، مدل‌های برنامه‌ریزی فازی-احتمالی استوار از نظر میانگین مقادیر تابع هدف در واقع‌نمایی‌های مختلف عملکرد بسیار بهتری داشته‌اند. از نظر انحراف استاندارد و انحراف مثبت استاندارد نیز مدل‌های مذکور عملکرد بهتری را نشان می‌دهند که به‌نوعی نشان‌دهنده استواری آن‌ها در مقایسه با مدل‌های دیگر است.

دو عامل بر استواری راه‌حل ارائه شده مؤثرند: ۱. ضریب استواری بهینگی است که این موضوع در نتایج نیز مشاهده می‌شود، به طوری که با افزایش آن عملکرد مدل استوار به‌طور شایان توجهی بهبود یافته است؛ ۲. جریمه نقض محدودیت‌ها که معمولاً هرچه مقدار این جریمه بزرگ‌تر باشد، راه‌حل ارائه شده نیز استواری بیشتری دارد، اما استواری بیشتر معمولاً هزینه‌های مورد انتظار بیشتری به دنبال دارد.

به‌منظور بررسی عملکرد مدل استوار پیشنهادی، مدل برای دو مقدار درجه اهمیت استواری بهینگی (یعنی $\eta = 1$ و $\eta = 2$) تحت داده‌های اسمی (داده‌های موجود هنگام تصمیم‌گیری) حل شده است. به‌علاوه، مسئله مورد مطالعه با استفاده از روش برنامه‌ریزی امکانی-منعطف ترکیبی ارائه شده (مدل ۱۹) و با مقادیر مختلف سطح ارضای محدودیت منعطف و سطوح اطمینان محدودیت‌های شانس ($0/7, 0/8, 0/9$) حل شده است. تمام مدل‌ها در نرم‌افزار بهینه‌سازی گمز کد و حل شده‌اند (با توجه به محدودیت فضای پژوهش امکان گزارش متغیرهای تصمیم وجود ندارد، اما فایل گمز مدل‌ها و همچنین خروجی‌های مربوط به هر یک در اختیار خوانندگان علاقه‌مند قرار می‌گیرد). حال برای مقایسه استواری و مطلوبیت نتایج، دوازده سری داده تصادفی برای پارامترهای غیرقطعی به‌منظور شبیه‌سازی واقعیت تولید شده‌اند و هر بار عملکرد جواب‌های به‌دست آمده از حل مدل‌های مذکور تحت واقعیت شبیه‌سازی شده تحلیل شده‌اند. جواب‌های حل هر مدل تحت داده‌های اسمی یعنی (y^*, x^*, b^*) در مدل واقع‌نمایی طبق فرم برداری زیر جایگذاری می‌شوند.

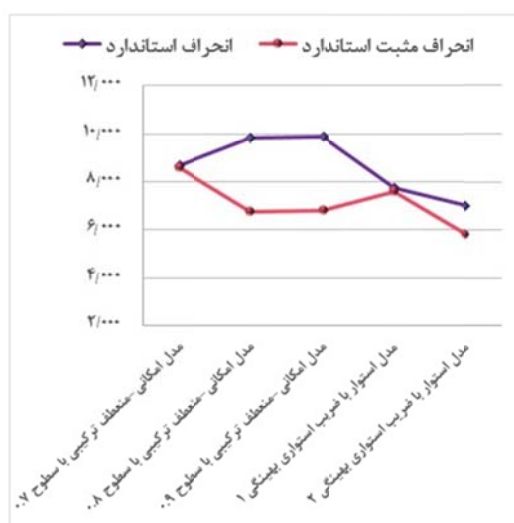
$$\begin{aligned} & \text{Min } f^{real}y^* + c^{real}x^* \\ & \quad + \delta R^d + \phi R^c + \psi_{ch} Re^{ch} + \psi_{fl} Re^{fl} \\ & \text{s. t.} \\ & Ax^* + R^d \geq d^{real}, \\ & Bx^* = 0, \\ & Dx^* \leq a^{real} N^{real} y^* + R^c, \\ & Hx^* \leq M W b^* \\ & T^{real} b^* \leq e + Re^{ch} + Re^{fl}, \end{aligned}$$

جدول ۴. عملکرد مدل‌های ارائه‌شده تحت واقع‌نمایی‌های مختلف

مدل استوار	مدل استوار	مدل MFPP	مدل MFPP	مدل MFPP	
$\eta = 2$	$\eta = 1$	سطوح ۰/۹	سطوح ۰/۸	سطوح ۰/۷	میانگین
۶۳۱/۰۰۸	۶۳۱/۴۹۱	۶۸۴/۴۲۱	۶۸۲/۲۳۸	۶۸۵/۴۴۲	
۶/۹۹۷	۷/۷۱۵	۹/۸۹۹	۹/۸۳۷	۸/۶۵۹	انحراف استاندارد
۵/۸۱۰	۷/۶۰۲	۶/۷۸۵	۶/۷۵۰	۸/۵۵۸	انحراف مثبت استاندارد

۱. مدل برنامه‌ریزی امکانی- منعطف ترکیبی (MFPP)^۷ با سطح ارضای محدودیت منعطف و سطوح اطمینان محدودیت‌های شانس برابر ۰/۷

۲. مدل برنامه‌ریزی فازی- احتمالی استوار با ضریب استواری بهینگی η



شکل ۵. مقایسه عملکرد مدل‌های ارائه‌شده از منظر انحراف استاندارد مقادیر تابع هدف واقع‌نمایی‌های تصادفی

مهمی از مسائل دنیای واقعی را پوشش می‌دهند. در تحلیل نتایج مطالعه موردی بررسی شد که دستیابی به استواری بیشتر، هزینه‌های بیشتری را نیز به دنبال دارد. در حالت کلی، سطح مطلوب استواری با توجه به نوع مسئله و در توازن با هزینه‌های مورد انتظار مسئله تعیین می‌شود؛ برای مثال، با توجه به ماهیت مسئله مورد مطالعه در این پژوهش و نقش مهم آن در نظام سلامت کشور، صرف هزینه‌های بیشتر برای دستیابی به پایایی و استواری هرچه بیشتر کاملاً توجیه‌پذیر است.

با توجه به اختلالات خاص تأمین‌کنندگان (از قبیل ورشکستگی، اختلالات سیاسی و...) پیشنهاد می‌شود پژوهشگران مدل ارائه‌شده را به یک شبکه زنجیره تأمین جامع توسعه دهند تا مسئله انتخاب تأمین‌کننده را

نتیجه‌گیری

به‌منظور مطالعه هم‌زمان عدم قطعیت معمول کسب‌وکار و اختلال از یک سو و همچنین الزامات منعطف مشتریان از سوی دیگر، یک مدل جدید برنامه‌ریزی فازی- احتمالی استوار در این پژوهش توسعه داده شده است. مدل ارائه‌شده در یک مطالعه موردی مربوط به یک شرکت فعال در نظام سلامت ایران اجرا شده است و نتایج نشان‌دهنده افزایش شایان توجه در پایایی و استواری جواب‌های به‌دست‌آمده از طریق مدل پیشنهادی نسبت به روش‌های مرسوم برنامه‌ریزی امکانی- منعطف ترکیبی است. به‌علاوه، به‌منظور توسعه مفهوم پایایی در مسئله مورد بررسی، اختلال جزئی غیرقطعی و محدودیت زمان مورد انتظار مشتری در مدل‌سازی مسئله لحاظ شده‌اند که ویژگی‌های

دربرگیرد. همچنین، در پژوهش‌های آتی بهتر است رویکردهای استوار دیگری برای مواجهه با اختلالات احتمالی به کار گرفته شود و یک روش برنامه‌ریزی احتمالی استوار واقع‌گرایانه توسعه داده شود.

مراجع

1. Stadler, H., Kilger, C., (2008), "Supply chain management and advanced planning: concepts, models, software, and case studies," 4th ed., 4th, Springer, .
2. Klibi, W., Martel, A., Guitouni, A., (2010). "The design of robust value-creating supply chain networks: A critical review." *European Journal of Operational Research*. Vol. 203, No.2, PP.283–293.
3. Kleindorfer, P.R., Saad, G.H., (2005). "Managing Disruption Risks in Supply Chains." *Production and Operations Management*. Vol. 14, No.1, PP.53–68.
4. Snyder, L. V., (2006). "Facility location under uncertainty: a review." *IIE Transactions*. Vol. 38, No.7, PP.547–564.
5. Pan, F., Nagi, R., (2010). "Robust supply chain design under uncertain demand in agile manufacturing." *Computers & Operations Research*. Vol. 37, No.4, PP.668–683.
6. Pishvae, M.S., Rabbani, M., Torabi, S.A., (2011). "A robust optimization approach to closed-loop supply chain network design under uncertainty." *Applied Mathematical Modelling*. Vol. 35, No.2, PP.637–649.
7. Pishvae, M.S., Razmi, J., Torabi, S.A., (2012). "Robust possibilistic programming for socially responsible supply chain network design: A new approach." *Fuzzy Sets and Systems*. Vol. 206, PP.1–20.
8. Lowrance, W.W., (1976), "Of Acceptable Risk: Science and the Determination of Safety.," *William Kaufman, Los Altos, CA., .*
9. Peng, P., Snyder, L. V., Lim, A., Liu, Z., (2011). "Reliable logistics networks design with facility disruptions." *Transportation Research Part B: Methodological*. Vol. 45, No.8, PP.1190–1211.
10. Snyder, L. V., Scaparra, M.P., Daskin, M.S., Church, R.L., (2006). "Planning for disruptions in supply chain networks." *Tutorials in Operations Research*. PP.234–257.
11. Vahdani, B., Tavakkoli-Moghaddam, R., Modarres, M., Baboli, A., (2012). "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, No.6, PP.1152–1168.
12. Baghalian, A., Rezapour, S., Farahani, R.Z., (2013). "Robust supply chain network design with service level against disruptions and demand uncertainties: A real-life case." *European Journal of Operational Research*. Vol. 227, No.1, PP.199–215.
13. Jabbarzadeh, A., Fahimnia, B., Seuring, S., (2014). "Dynamic supply chain network design for the supply of blood in disasters: A robust model with real world application." *Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review*. Vol. 70, PP.225–244.
14. Shishebori, D., Yousefi Babadi, A., (2015). "Robust and reliable medical services network design under uncertain environment and system disruptions." *Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review*. Vol. 77, PP.268–288.
15. Azad, N., Saharidis, G.K.D., Davoudpour, H., Maleky, H., Yektamaram, S.A., (2013). "Strategies for protecting supply chain networks against facility and transportation disruptions: an improved Benders decomposition approach." *Annals of Operations*
16. Drezner, Z., (1987). "Heuristic solution methods for two location problems with unreliable facilities." *Journal of the Operational Research Society*. Vol. 38, No.6, PP.509–514.
17. Snyder, L. V., Daskin, M.S., (2005). "Reliability Models for Facility Location: The Expected Failure Cost Case." *Transportation Science*. Vol. 39, No.3, PP.400–416.

18. Snyder, L. V., Daskin, M.S., (2006). "Stochastic p -robust location problems." *IIE Transactions*. Vol. 38, No.11, PP.971–985.
 19. Shen, Z.-J.M., Zhan, R.L., Zhang, J., (2011). "The Reliable Facility Location Problem: Formulations, Heuristics, and Approximation Algorithms." *INFORMS Journal on Computing*. Vol. 23, No.3, PP.470–482.
 20. Cui, T., Ouyang, Y., Shen, Z., (2010). "Reliable facility location design under the risk of disruptions." *Operations Research*. Vol. 58, No.4-part-1, PP.998–1011.
 21. Chopra, S., Reinhardt, G., Mohan, U., (2007). "The importance of decoupling recurrent and disruption risks in a supply chain." *Naval Research Logistics*. Vol. 54, No.5, PP.544–555.
 22. Lim, M., Daskin, M.S., Bassamboo, A., Chopra, S., (2009). "A facility reliability problem: Formulation, properties, and algorithm." *Naval Research Logistics (NRL)*. Vol. 57, No.1, PP.58–70.
 23. Lim, M.K., Bassamboo, A., Chopra, S., Daskin, M.S., (2013). "Facility Location Decisions with Random Disruptions and Imperfect Estimation." *Manufacturing & Service Operations Management*. Vol. 15, No.2, PP.239–249.
 24. Hasani, A., Zegordi, S.H., Nikbakhsh, E., (2012). "Robust closed-loop supply chain network design for perishable goods in agile manufacturing under uncertainty." *International Journal of Production Research*. Vol. 50, No.16, PP.4649–4669.
 25. De Rosa, V., Gebhard, M., Hartmann, E., Wollenweber, J., (2013). "Robust sustainable bi-directional logistics network design under uncertainty." *International Journal of Production Economics*. Vol. 145, No.1, PP.184–198.
 26. Vahdani, B., Tavakkoli-Moghaddam, R., Jolai, F., (2013). "Reliable design of a logistics network under uncertainty: A fuzzy possibilistic-queueing model." *Applied Mathematical Modelling*. Vol. 37, No.5, PP.3254–3268.
 27. Hatefi, S.M., Jolai, F., (2014). "Robust and reliable forward–reverse logistics network design under demand uncertainty and facility disruptions." *Applied Mathematical Modelling*. Vol. 38, No.9-10, PP.2630–2647.
 28. Li, Q., Zeng, B., Savachkin, A., (2013). "Reliable facility location design under disruptions." *Computers & Operations Research*. Vol. 40, No.4, PP.901–909.
 29. Berman, O., Krass, D., Menezes, M.B.C., (2013). "Location and reliability problems on a line: Impact of objectives and correlated failures on optimal location patterns." *Omega*. Vol. 41, No.4, PP.766–779.
 30. Razmi, J., Zahedi-Anaraki, A., Zakerinia, M., (2013). "A bi-objective stochastic optimization model for reliable warehouse network redesign." *Mathematical and Computer Modelling*. Vol. 58, No.11-12, PP.1804–1813.
 31. Wang, X., Ouyang, Y., (2013). "A continuum approximation approach to competitive facility location design under facility disruption risks." *Transportation Research Part B*. Vol. 50, PP.90–103.
 32. An, Y., Zeng, B., Zhang, Y., Zhao, L., (2014). "Reliable p-median facility location problem: two-stage robust models and algorithms." *Transportation Research Part B: Methodological*. Vol. 64, PP.54–72.
 33. Amaro, A.C.S., Barbosa-Póvoa, A.P.F.D., (2009). "The effect of uncertainty on the optimal closed-loop supply chain planning under different partnerships structure." *Computers & Chemical Engineering*. Vol. 33, No.12, PP.2144–2158.
 34. Soyster, A.L., (1973). "Technical note—convex programming with set-inclusive constraints and applications to inexact linear programming." *Operations Research*. Vol. 21, No.5, PP.1154–1157.
 35. Mulvey, J.M., Vanderbei, R.J., Zenios, S.A., (1995). "Robust Optimization of Large-Scale Systems." *Operations Research*. Vol. 43, No.2, PP.264–281.
 36. Ben-Tal, A., Nemirovski, A., (1998). "Robust Convex Optimization." *Mathematics of Operations Research*. Vol. 23, No.4, PP.769–805.
-

37. Ben-Tal, A., Nemirovski, A., (1999). "Robust solutions of uncertain linear programs." *Operations Research Letters*. Vol. 25, No.1, PP.1–13.
38. Ben-Tal, A., Nemirovski, A., (2000). "Robust solutions of Linear Programming problems contaminated with uncertain data." *Mathematical Programming*. Vol. 88, No.3, PP.411–424.
39. El Ghaoui, L., Oustry, F., Lebret, H., (1998). "Robust Solutions to Uncertain Semidefinite Programs." *SIAM Journal on Optimization*. Vol. 9, No.1, PP.33–52.
40. Bertsimas, D., Sim, M., (2003). "Robust discrete optimization and network flows." *Mathematical Programming*. Vol. 98, No.1-3, PP.49–71.
41. Bertsimas, D., Sim, M., (2004). "The Price of Robustness." *Operations Research*. Vol. 52, No.1, PP.35–53.
42. Dubois, D., Prade, H., (1988), "Possibility theory: an approach to computerized processing of uncertainty," *Springer*, Boston, .
43. Verdegay, J.L., (1982). "Fuzzy mathematical programming." *Fuzzy Information and Decision Processes*. Vol. 231, PP.237.
44. Lodwick, W. a., Jamison, K.D., (2007). "Theoretical and semantic distinctions of fuzzy, possibilistic, and mixed fuzzy/possibilistic optimization." *Fuzzy Sets and Systems*. Vol. 158, No.17, PP.1861–1872.
45. Delgado, M., Verdegay, J., Vila, M., (1989). "A general model for fuzzy linear programming." *Fuzzy Sets and Systems*. Vol. 29, No.1, PP.21–29.
46. Untiedt, E., A Parametrized Model for Optimization with Mixed Fuzzy and Possibilistic Uncertainty, in: W. Lodwick, J. Kacprzyk (Eds.), *Fuzzy Optimization SE - 9*, *Springer Berlin Heidelberg*, : pp. 193–208.
47. Liu, B., Iwamura, K., (1998). "Chance constrained programming with fuzzy parameters." *Fuzzy Sets and Systems*. Vol. 94, No.2, PP.227–237.
48. Heilpern, S., (1992). "The expected value of a fuzzy number." *Fuzzy Sets and Systems*. Vol. 47, No.1, PP.81–86.

واژه‌های انگلیسی به ترتیب استفاده در متن

1. Business-as-usual uncertainty
2. Disruption
3. Robust
4. Reliable
5. Verdegay
6. Realization model
7. Mixed flexible- probabilistic programming (MFPP)