

## طراحی شبکه‌ی زنجیره‌ی تأمین پایا برای محصول مازولار در شرایط عدم قطعیت

### مطالعه‌ی موردی: پمپ‌های کرایونیک صادرات LPG

علیرضا وهابی<sup>۱</sup>، علیرضا حمیدیه<sup>۲\*</sup>

۱- دانشجوی کارشناسی ارشد، ۲- استادیار گروه مهندسی صنایع، دانشگاه پیام نور، تهران، ایران

(دریافت: ۱۴۰۰/۰۹/۱۰، پذیرش: ۱۴۰۱/۰۱/۲۷)

#### چکیده

امروزه شرکت‌ها با توجه به ویژگی‌های اقتصادی تجارت مدرن در مقیاس جهانی و عملیات‌های پیچیده زنجیره تامین سعی دارند به تقاضای مشتریان پاسخ دهند. عدم قطعیت تقاضای جهانی چالش بزرگی است که با وقوع اختلالات تشدید می‌شود. در این مطالعه، یک مدل برنامه ریزی ریاضی غیرخطی تصادفی فازی چند محصولی برای طراحی شبکه زنجیره تامین پایا با در نظر گرفتن محصول با تکنولوژی تولید مازولار تحت ریسک اختلال پیشنهاد شده است. همچنین، یک سیستم پشتیبانی تصمیم‌گیری برای تولید محصول مازولار طراحی شده. که نقشی عمده در افزایش قابلیت استفاده مجدد محصولات و کاهش ضایعات ایفا می‌کند. مطالعه موردی بر روی تولید پمپ‌های کرایونیک صادرات LPG تمرکز دارد که از تجهیزات حیاتی در صادرات پروپان و بوتان مایع است. ساختار این شبکه زنجیره تامین شامل سطوح تامین‌کنندگان مازول ها، مراکز تولید اولیه، مراکز بازرسی، مراکز تعمیر، مراکز بازتولید و مشتریان است. برای مواجه با اختلالات یک رویکرد تصادفی سناریو محور مورد استفاده قرار گرفته و عدم قطعیت پارامتری با رویکرد ترکیبی برنامه‌ریزی امکانی - استوار مدیریت شده است. ارزیابی مدل با رویکرد دقیق در نرم افزار GAMS با حل کننده CPLEX و تجزیه و تحلیل حساسیت بر پارامترهای غیر قطعی انجام شده است. نتایج تحقیق نشان می‌دهد که رویکرد حاضر ضمن کنترل عدم قطعیت، جریان بهینه تسهیلات را تضمین می‌کند.

**واژه‌های کلیدی:** زنجیره تامین پایا، محصولات مازولار، عدم قطعیت، برنامه‌ریزی تصادفی امکانی استوار

#### ۱- مقدمه

می‌تواند برای مراکز تولیدی از تهدید تبدیل به فرصت شود. تسهیلات جمع‌آوری و بازرسی، بازیابی، تعمیر، باز تولید و دفع، زیرساخت‌های زنجیره بازگشتی هستند [۲]. این تسهیلات می‌تواند اثرات مثبتی بر عملکرد مراکز تولید داشته باشند و بین تولیدکنندگان فضای رقابتی ایجاد کنند. عملکرد تسهیلات جریان برگشتی محققان بسیاری را به بررسی عوامل اقتصادی، اجتماعی و زیست محیطی در این جریان علاقمند کرده است [۳].

برنامه‌ریزی لجستیک حلقه بسته یک تاکتیک مهم برای دستیابی به توسعه پایدار است [۴]. شبکه زنجیره تامین حلقه بسته در مقایسه با زنجیره تامین سنتی پیچیدگی و عدم قطعیت بیشتری دارد. شبکه زنجیره تامین حلقه بسته تحت عدم قطعیت به علت اثر پذیری زیاد از انواع اختلالات به صورت فزاینده در محیط‌های پژوهشی و تجاری مورد تایید هستند [۵]. در مسائل طراحی شبکه زنجیره تامین حلقه بسته، اهمیت جریان مالی، عدم قطعیت و ریسک باعث ایجاد ابزار تصمیم‌گیری مناسب برای مقابله با پارامترهای نامشخص غیر قطعی می‌شود [۶].

امروزه در بازار اقتصادی، اصلی‌ترین اهداف مدیران کاهش هزینه‌ها در سطح اقتصاد خرد، صرفه‌جویی در منابع مالی در سطح اقتصاد کلان، کاهش ریسک سرمایه‌گذاری و کسب مزایای رقابتی در بازار است. فعالان حوزه‌های مختلف صنعتی به مدیریت زنجیره تامین علاقمند هستند و این تکنیک را در مراحل تامین مواد اولیه، تولید، توزیع تا ارسال محصولات و خدمات به مشتری استفاده و پیاده‌سازی می‌کنند. حرکت جریان بین تسهیلات شبکه زنجیره تامین به دو صورت رو به جلو یا بازگشتی است. جریان برگشتی برای بازگرداندن محصولات معیوب یا استفاده نشده به چرخه تولید است. اگر در جریان برگشتی، محصولات تولیدی به مراکز تولید بازگردانده شوند، زنجیره حلقه بسته است [۱].

یکی از مسائل مهم در زمینه کاهش هزینه‌های صنعتی در مراحل تولید، حذف یا مصرف ضایعات است. ضایعات صنعتی

پیچیدگی زنجیره تامین بیشتر، سطح عدم اطمینان و ریسک بیشتر است. در زنجیره پایا، احتمال عملکرد موفق سیستم‌ها و تجهیزات با حداقل خرابی در ارزیابی قابلیت اطمینان در پیشگیری یا کاهش خسارات ناشی از خرابی سیستم‌ها مهم است [۱۲، ۱۳].

اکثر تحقیقات قبلی، در مورد پایایی زنجیره تامین تنها بر برخی از مسائل مربوط به قابلیت اطمینان برای ساختار زنجیره تامین تمرکز داشتند. در سال‌های اخیر، قابلیت اطمینان در جریان خرید زنجیره تامین پایا مورد توجه بیشتری قرار گرفته است.

در دنیای اقتصاد، تجزیه و تحلیل ماژولار برای پایایی زنجیره‌های تامین به صورت مداوم در حال تکامل است و شرکت‌ها در تلاش برای سازگاری و مقابله با ریسک ناشی از اختلالات هستند. برای مقابله با این چالش‌ها توسعه زنجیره‌های تامین پایا مورد نیاز است [۱۴]. طراحی محصولات مختلف صنعتی، عواملی نظیر محیط کسب و کار، توانایی تولید کننده، نیازهای مشتری، زمان مورد انتظار جهت تولید و ارائه محصول، سیاست‌های کاری و... باعث می‌گردد تا تصمیمات متنوع در خصوص روش تولید اخذ گردد. طراحی ماژولار در صنعت مرسوم بوده و در نهایت، یک محصول نهایی با مشارکت تعدادی از تولیدکنندگان تخصصی، نهایی شده و به مشتری ارائه می‌گردد. در بحث زنجیره تامین کالا، اغلب تولید کننده یک ماژول محصول به عنوان یک تامین کننده مواد در نظر گرفته می‌شوند. تولیدکنندگان ماژول‌های محصول نهایی، خودشان دارای زنجیره‌های تامینی شامل: تامین کنندگان مواد اولیه، شرکت‌های حمل و نقل و مشتری می‌باشند، که اثرات زیادی بر اهداف زنجیره تامین نهایی دارند [۱۵].

در این مقاله، عدم قطعیت پارامترها و پایایی تسهیلات در یک مساله طراحی زنجیره تامین دو هدفه با محصولات ماژولار مورد بررسی قرار گرفته است. کمینه‌سازی کل هزینه‌ها و کمینه‌سازی مقدار عرضه مستقیم محصول از کارخانه به مشتریان (به عبارت دیگر، حداکثر سازی قابلیت اطمینان از تضمین کیفیت و سالم بودن محصولات عرضه شده به مشتریان) دو هدف مساله هستند. ساختار این زنجیره تامین ۶ سطح تامین کنندگان ماژول‌ها، مراکز تولید اولیه، مراکز بازرسی، مراکز تعمیر، مراکز بازتولید و مشتریان را شامل می‌شود. ظرفیت تامین کنندگان از جمله پارامترهای غیر قطعی تحت شرایط اختلال تصادفی است. رویکردهای غیر قطعی تصادفی بر اساس سناریو و رویکرد فازی امکانی در مدل سازی به همراه روش بهینه‌سازی برنامه‌ریزی آرمانی تصادفی فازی برای حل مدل استفاده شده است. تولید این

شرکت‌هایی که در مقیاس جهانی فعالیت دارند با توجه به ویژگی‌های تجارت اقتصاد مدرن برنامه‌ریزی پیچیده‌تری در روند عملیاتی زنجیره، پیاده‌سازی و اجرا می‌کنند تا پاسخ‌گوی تقاضای مشتری در سراسر زنجیره جهانی باشند. در این شرایط شرکت‌ها در شرایط ریسک و اختلالات موجود در هر منطقه، تقاضای غیر قطعی جهانی را پیش بینی می‌کنند [۷]. واکنش‌های مناسب سازمان‌ها و شرکت‌های تولیدی در رقابت جهانی در محیطی که به صورت دائم در حال تغییر است ضرورت دارد و لازم است پایایی و انعطاف‌پذیری آن‌ها در شرایط عدم قطعیت افزایش یابد. سازمان‌های امروزی در عرصه ملی و جهانی به منظور کسب جایگاهی مناسب و حفظ آن نیازمند بهره‌گیری از الگوهای مناسب هم‌چون مدیریت زنجیره تامین در راستای تحقق مزیت رقابتی و انتظارات مشتریان هستند. عدم قطعیت عامل اصلی در فرآیندهای تصمیم‌گیری در زنجیره تامین است که اثر بخشی پیکربندی و هماهنگی را در طول زنجیره تحت تاثیر قرار می‌دهد. در حقیقت توجه به بهینه‌سازی در زنجیره تامین در شرایط عدم قطعیت منجر به کاهش هزینه‌ها، بهبود کیفیت و دستیابی به مزیت و موقعیت رقابتی خواهد شد. عدم قطعیت در سیستم زنجیره تامین در تصمیم‌گیری نقش کلیدی دارد و به دو دسته نامشخص محیطی و سیستماتیک تقسیم می‌شود. عدم قطعیت تاثیر بسزایی در عملکرد زنجیره تامین دارد. نگرانی در مورد شیوع اختلالات و تلفات عمده آن‌ها باعث شده است که بسیاری از محققان هنگام طراحی شبکه‌های زنجیره تامین، به پایایی سیستم‌ها توجه کنند. عدم قطعیت ذاتی پارامترهای ورودی به دلیل تأثیرات سوء بر تصمیمات استراتژیک، تاکتیکی و عملیاتی یکی دیگر از مسائل مهم در طراحی شبکه‌های زنجیره تامین است [۸].

اخیرا، شرکت‌های بزرگ تمایل رو به رشدی را برای افزایش پایایی و پایداری زنجیره‌های تامین خود به منظور افزایش رضایت مشتریان از لحاظ تحقق به موقع تقاضا و سازگاری با مقررات زیست محیطی نشان داده‌اند [۹].

در گذشته، رویکرد قابلیت اطمینان در صنایعی مانند؛ صنایع هسته‌ای، هوافضا و نظامی برای پایایی سیستم‌ها در این صنایع مورد توجه قرار بوده است. اما امروزه، پایایی سیستم‌ها دغدغه‌ای فراگیر برای جامعه و محیط زیست است. از کار افتادن سیستم‌ها موجب رخداد اختلال در سطوح مختلف می‌شود. در چنین شرایطی، با افزایش پایایی زنجیره تامین می‌توان ریسک احتمالی شرایط غیر قطعی را کاهش داد [۱۰، ۱۱].

در طراحی و برنامه‌ریزی سیستم‌ها توجه به پایایی سیستم، کارایی آن را در هنگام مواجهه با اختلال تضمین می‌نماید. هر چه

دانش بنیان داخلی، در مسیر پژوهشی این تحقیق، هزینه‌های مکان‌یابی هر کدام از آن‌ها جهت تولید در داخل ایران در نظر گرفته شده است که از این منظر نیز پژوهش دارای نوآوری است.

ساختار این مقاله در بخش‌های بعدی به شرح زیر است:

در بخش دوم، مروری بر مطالعات پژوهشی پیشین انجام شده است. در بخش سوم بیان مسأله، در بخش چهارم مدل‌سازی ریاضی، در بخش پنجم رویکرد حل مسأله، بخش ششم نتایج محاسباتی و در بخش هفتم نتایج تحقیق شرح داده شده است.

## ۲- مرور ادبیات

اختلالات و ریسک ناشی از آن، یکی از مهم‌ترین چالش‌ها در طراحی زنجیره تأمین است که به شکل احتمال یک رخداد در شدت اثرات غیر مطلوب یک سیستم تعریف می‌شود. در طراحی مدل‌های تحت ریسک اختلالات باید میزان گستردگی و شدت اختلال در نظر گرفته شود. میزان گستردگی و شدت اختلالات زنجیره‌های تأمین یک طیف از اختلالات بسیار جزئی تا اختلالات کامل را شامل می‌شود [۱۶]. با توجه به رشد روز افزون شبکه‌های زنجیره تأمین در اقتصاد جهانی، ریسک ناشی از اختلال رخدادهای فنی و تکنولوژیکی<sup>۸</sup>، عملیاتی (نقص محصولات تولیدی، تاخیر مراکز تأمین، خطای اپراتورها، خرابی سیستم‌ها، تاخیر در حمل و نقل، تصادفات جاده‌ای، ...)، طبیعی<sup>۹</sup> (طوفان، فوران آتشفشان‌ها، زلزله، طوفان‌ها، سونامی، ...)، انسانی (اعتصاب کارگران، جنگ، حمله تروریستی، آتش سوزی، قطع برق، ...) و مالی<sup>۱۰</sup> (تحریم، اختلال در امور تجاری، بحران مالی، نوسان ارزها، ورشکستگی مراکز تأمین، ...) بیشتر خواهد شد [۱۷]. طراحی زنجیره‌های تأمین در شرایط عدم قطعیت تحت ریسک اختلالات منجر به طراحی زنجیره تأمین پایایی است که عملکردی مطلوب با کارایی لازم را دارا هستند. لذا، یک شبکه زنجیره تأمین پایا باید در شرایط غیر قطعی استوار و مستحکم باشد و در برابر رخداد اختلالات و خرابی یا شکست هر یک از تسهیلات قابل اطمینان باشد [۱۸]. درزنر<sup>۱۱</sup> در سال ۱۹۸۷، مدل کلاسیک مکان‌یابی تسهیلات را به صورت پایا توسعه و ارائه داد [۱۹]. اسنایدر<sup>۱۲</sup> و دسکین<sup>۱۳</sup> در سال ۲۰۰۵ مقاله‌ای در زمینه مدل‌های پایا برای مکان‌یابی تسهیلات [۲۰]، در سال ۲۰۰۶ مقاله‌ای در زمینه اختلالات در زنجیره تأمین [۲۱] و در سال ۲۰۰۷ مقاله‌ای در زمینه طراحی شبکه‌های پایا [۲۲] ارائه کردند.

محصول، همواره با طیف وسیعی از عدم قطعیت در حوزه‌های مختلف مواجه می‌باشد. در این تحقیق، سعی بر آن است با طراحی صورت گرفته، نسبت به شناسایی و انتخاب روش مناسب جهت کنترل عدم قطعیت‌ها پرداخته شود. تقاضا و ظرفیت در صنعت تولید پمپ‌های کرایوژنیک صادرات<sup>۱</sup> LPG، از موضوعاتی است که به دلیل وابسته بودن به تصمیمات استراتژیک در ارکان بالادستی وزارت نفت با اتخاذ تصمیمات کلان سیاسی همواره دست‌خوش تغییر می‌گردد. در برخی موارد مشاهده می‌شود که به دلیل افزایش تحریم‌ها، فروش فرآورده‌های نفتی کاهش یافته و خرید این محصول نیز به دلیل عدم صرفه اقتصادی برای متقاضی، به شدت کاهش می‌یابد. نوسان نرخ ارز و قیمت فروش LPG نیز از موضوعات مهم در مبحث عدم قطعیت می‌باشد. تغییرات نرخ ارز منجر به تغییر استراتژی تولید پالایشگاه‌های نفتی می‌شود که این موضوع نیز تاثیر مستقیم در کاهش و یا افزایش ظرفیت تولید پمپ‌های LPG دارد. از طرفی دیگر، عدم قطعیت مربوط به مراکز تولید مازول‌ها می‌باشد که دارای زنجیره‌های تأمین مستقل است و بروز هرگونه اختلال در تأمین هر یک آن‌ها، تولید محصول نهایی را تحت تاثیر قرار می‌دهد. مازول‌هایی که در تولید این محصول مورد استفاده قرار می‌گیرند، به دلیل این که باید قابلیت کارکرد در دمای حدود ۲۰۰- درجه سانتی‌گراد را داشته باشند، در صنعت تولیدی خود جزء محصولات با تکنولوژی تولید بالا<sup>۲</sup> محسوب می‌شود و طراحی زنجیره تأمین هر کدام از آن‌ها می‌تواند موضوع پژوهش جداگانه‌ای قرار گیرد که با توجه به شرایط خاص هر صنعت، قطعاً مدل با اختلالات و عدم قطعیت‌های منحصر به فرد هر یک از آن‌ها مواجهه می‌باشد. مازول‌ها به شرح زیر قابل ارائه می‌باشد:

- ✓ روتور<sup>۳</sup>
- ✓ استاتور<sup>۴</sup>
- ✓ ترمینال توزیع برق<sup>۵</sup>
- ✓ ترمینال توزیع ابزار دقیق<sup>۶</sup>
- ✓ سنسور پایش ارتعاش<sup>۷</sup>

در حال حاضر چرخه تأمین مازول‌ها به صورت کامل و در برخی موارد با درصد بالایی از منابع خارج از کشور می‌باشد که با توجه به بومی سازی دانش تولید مازول‌ها توسط شرکت‌های

<sup>۸</sup> Technological

<sup>۹</sup> Natural

<sup>۱۰</sup> Financial

<sup>۱۱</sup> Drezner

<sup>۱۲</sup> Snyder

<sup>۱۳</sup> Daskin

<sup>۱</sup> Liquid Pressure Gas

<sup>۲</sup> High Tech

<sup>۳</sup> Cryogenic Rotor

<sup>۴</sup> Cryogenic Statot

<sup>۵</sup> Power Terminal Header

<sup>۶</sup> Instrument Terminal Header

<sup>۷</sup> Cryogenic Vibration Sensor

سود اولیه در مرحله اول، تخصیص با در نظر گرفتن قابلیت اطمینان کل اعضا در مرحله دوم در نظر گرفته شده است [۳۴]. پسندیده و همکاران، یک مدل برنامه‌ریزی ریاضی عدد صحیح مختلط خطی دو هدفه برای توسعه شبکه زنجیره تامین سه سطحی با در نظر گرفتن پایایی در سطح انبارها با هدف حداقل سازی کل هزینه‌ها و حداکثرسازی میانگین تعداد کالاهای ارسالی به هر مشتری ارائه کردند و نتایج این مدل، بر اساس ۶ رویکرد حل بهینه‌سازی چندهدفه بررسی شده است [۳۵]. لی و همکاران<sup>۸</sup>، در یک زنجیره تامین غیرمتمرکز تاثیر تصمیم‌گیری متوالی برای افزایش پایایی ذاتی مراکز تامین تحت شرایط ریسک با تاثیرپذیری قیمت‌گذاری شرکت‌ها را بررسی کردند [۳۶]. حمیدیه و همکاران، یک مدل ریاضی برای طراحی یک شبکه زنجیره تامین پایدار حلقه بسته پاسخ‌گو، تک محصولی، چند سطحی تحت شرایط عدم قطعیت بر اساس یک رویکرد برنامه‌ریزی استوار احتمالی ارائه کردند. مدل پیشنهادی علاوه بر حداقل‌سازی کل هزینه‌ها، در برابر ریسک اختلال یک شبکه استوار موثر ایجاد و سرعت تحویل محصول را در سطوح ایمنی مناسب کنترل می‌کند. در نهایت، اثربخشی و کاربرد مدل در یک پروژه ملی با داده‌های اسمی واقعی نمایش داده می‌شود [۸]. رحمانی و محمودیان، در پژوهشی یک مدل ریاضی برای طراحی شبکه زنجیره تامین پایا و مقاوم جهت غلبه بر عدم قطعیت پارامترهای تقاضا و هزینه‌های تولید تحت ریسک اختلال موجود در تسهیلات با سناریوهای متعدد با در نظر گرفتن کاهش انتشار گازهای گل‌خانه‌ای CO<sub>2</sub> ارائه کردند. انتشار گازهای گل‌خانه‌ای CO<sub>2</sub> با توجه تصمیمات استراتژیک در مرحله طراحی برای تجهیزات سرمایه‌ای تولید و از نظر برنامه‌ریزی عملیاتی در تولید و حمل و نقل مورد توجه و بررسی قرار گرفته است. یک روش حل براساس الگوریتم تجزیه بندرز توصیه می‌شود و مطالعات محاسباتی کارایی آن را نشان می‌دهند. نتایج محاسباتی مدل پایایی و استحکام مدل و رویکرد حل الگوریتم تجزیه بندرز پیشنهادی را نشان می‌دهند [۳۷]. ها و همکاران<sup>۹</sup>، در پژوهشی یک تعریف ریاضی برای اندازه‌گیری پایایی سیستم زنجیره تامین و عملکردهای مربوطه بر اساس نظریه قابلیت اطمینان سنتی و مدل‌های اساسی قابلیت اطمینان ساختاری برای انواع زنجیره‌های تامین ارائه کردند. این مقاله هم‌چنین تایید می‌کند که عملکردهای پیشنهادی و مدل‌های قابلیت اطمینان ساختاری برای انواع مختلف زنجیره تامین با مطالعه موردی یک شرکت مونتاژ کامپیوتر قابل اجرا است [۳۸]. تیرکلایی و همکاران،

تعدادی از محققان در سال‌های بعد مقالاتی در زمینه‌هایی مانند؛ طراحی تسهیلات پایا [۳، ۵، ۱۸، ۲۲-۲۴]، مکان‌یابی تسهیلات پایا [۱۹، ۲۰، ۲۵-۳۰]، سناریوهای خرابی تسهیلات [۳۱، ۳۲]، ... در زنجیره‌های تامین و سیستم‌های صنعتی پایا ارائه کرده‌اند.

با توجه به موضوع این تحقیق، بررسی ادبیات موضوع از مطالعات پیشین در زمینه مباحث فازی، پایایی و ماژولار به شرح زیر انجام شده است.

کیو و همکاران<sup>۱</sup>، یک مدل برنامه‌ریزی ریاضی مختلط عدد صحیح خطی برای مکان‌یابی تسهیلات پایا در حالت گسسته برای حداقل سازی هزینه‌های اولیه احداث و هزینه حمل و نقل محصولات ارائه کردند. برای مسائل اندازه‌های کوچک و متوسط رویکرد حلی بر مبنای آزادسازی لاگرانژ و رویکردی برای حل مدل بر مبنای روش تقریب پیوسته برای مسائل اندازه‌های بالاتر ارائه دادند [۲۵]. چاوگ-هسو و لی<sup>۲</sup>، در پژوهشی دو مدل ریاضی طراحی شبکه‌های زنجیره تامین، تصمیم‌گیری بهینه در تخصیص مجدد تولید و ارزیابی عملکرد مراکز تولید تحت شرایط نوسانات و اختلالات اقتصادی و تقاضا با رویکرد پایایی در عملکرد کارخانه‌های این مراکز تولیدی توسعه و ارائه دادند. آن‌ها یک منبع پشتیبان برای مراکز تولید در برنامه‌ریزی فرآیندهای زنجیره در عدم قطعیت تقاضا در نظر گرفتند [۲۳]. وحدانی و همکاران، یک مدل برنامه‌ریزی عدد صحیح مختلط خطی دو هدفه برای طراحی شبکه زنجیره تامین حلقه بسته پایا شامل دو شبکه زنجیره تامین رو به جلو و معکوس با روش حل فازی تعاملی ترکیبی از برنامه‌ریزی احتمالی فازی<sup>۳</sup>، برنامه‌ریزی فاصله‌ای<sup>۴</sup> و برنامه‌ریزی محدودیت شانس<sup>۵</sup> ارائه کردند در نهایت، آزمایش‌های محاسباتی برای نشان دادن قابلیت اجرا و مناسب بودن مدل پیشنهادی در محیط زنجیره تامین و کمک به تصمیم‌گیرندگان برای تسهیل تجزیه و تحلیل‌های خود ارائه شده است [۲۴]. بن یوسف و همکاران<sup>۶</sup>، یک زنجیره تامین پایا با تخصیص و مکان‌یابی در ۳ سطح تامین‌کننده، توزیع‌کننده و خرده‌فروشی با در نظر گرفتن پایایی مراکز تامین بر اساس رویکرد آزادسازی لاگرانژ طراحی کردند [۳۳]. فنگ و همکاران<sup>۷</sup>، یک زنجیره تامین دو مرحله‌ای با در نظر گرفتن پایایی برای تخصیص سود و تسهیم درآمد بین اعضا ارائه کردند. تخصیص سود طبق قرارداد در دو مرحله انجام می‌شود: تصمیم‌گیری برای تخصیص

<sup>1</sup> Cui et al

<sup>2</sup> Hsu & Li

<sup>3</sup> Fuzzy Probabilistic Programming

<sup>4</sup> Interval Programming

<sup>5</sup> Chance-Constrained Programming

<sup>6</sup> Benyoucef et al

<sup>7</sup> Feng et al

<sup>8</sup> Li et al

<sup>9</sup> Ha et al

گازهای صنعتی و سیستم‌های تولید آن با چارچوب طراحی ماژولار ارائه کردند. استراتژی‌های تولید صنعتی در مدل‌سازی شبکه زنجیره تأمین و سیستم‌های تولیدی همراه با رویکرد تکنیک افق غلتان برای کاهش عدم قطعیت در تقاضا به صورت ترکیبی در نظر گرفته شده است. بهینه‌سازی هم‌زمان زنجیره تأمین گازهای صنعتی و سیستم‌های تولید برای یک مرکز تولید گاز صنعتی در نرم‌افزار ++C توسعه و اجرا داده شده است [۴۱]. آگیولا و همکاران<sup>۴</sup>، یک مدل ریاضی دو هدفه برای طراحی هم‌زمان زنجیره تأمین و معماری محصول ماژولار تحت تأثیرات ریسک در شرایط عدم قطعیت با رویکرد حل برنامه ریزی آرمانی طراحی کردند [۴۲]. بویلاک‌کی‌بوآ و همکاران<sup>۵</sup>، در پژوهشی با استفاده از مطالعه دقیق مثلث تاب‌آوری، ابزار شهودی و تجزیه و تحلیل ماژولار عملکرد یک زنجیره تأمین در هنگام ایجاد اختلال بررسی و ارزیابی کردند [۱۴]. اچ‌سیو و همکاران<sup>۶</sup>، یک مدل ریاضی برای بهینه‌سازی استوار زنجیره تأمین ساخت و ساز ماژولار تحت شرایط عدم قطعیت عملیاتی ارائه کردند. در این مدل، مکان‌یابی بهینه انبار، برنامه‌ریزی مراحل تولید، ذخیره‌سازی موجودی و مونتاژ در نظر گرفته شده است. عدم قطعیت موجود در سایت‌های ساخت و ساز ناشی از نامساعد بودن آب و هوا، دیرکرد در تحویل، نوسانات بهره‌وری نیروی کار و اختلال در عملکرد جرثقیل در نظر گرفته شده است. مطالعه موردی این تحقیق، ساخت خوابگاه مدرسه است. برنامه‌ریزی تصادفی دو مرحله‌ای با رویکرد بهینه‌سازی استوار با توجه به عدم قطعیت موجود مقایسه شده‌اند [۴۳]. اچ‌سیو و همکاران، یک مدل برنامه‌ریزی لجستیک چند مرحله‌ای تصادفی برای طراحی زنجیره تأمین ماژولار در صنعت ساختمان را ارائه کردند. تقاضا در این زنجیره تصادفی منجر به اخذ چندین عملیاتی توسط مدیران در طی اجرای پروژه در نقاط زمانی متعددی می‌شود. تراکم حجم ترافیک، شلوغی محیطی و عملکرد ماژول‌های نهایی عدم قطعیت موجود در جریان حمل و نقل و موجودی زمانی را افزایش می‌دهد. در این مدل برنامه‌های بهینه برای تولید، حمل و نقل و موجودی در نظر گرفته شده است. در این تحقیق مقایسه مدل برنامه‌ریزی تصادفی چند مرحله‌ای با دو مرحله‌ای نشان می‌دهد که به لحاظ اقتصادی و ریسک‌گریز برنامه‌ریزی تصادفی چند مرحله‌ای عملکرد بهتری دارد [۴۴]. آلن و همکاران<sup>۷</sup>، یک مدل برنامه‌ریزی عدد صحیح مختلط خطی برای تعیین زمان‌بندی تولید بهینه یک شبکه زنجیره تأمین با استفاده از واحدهای ماژولار ارائه کردند. اثر بخشی این پژوهش با استفاده از

پژوهشی در دو سطح ارائه کردند. در سطح اول انتخاب تأمین‌کننده پایا با رویکرد پایداری براساس روش ترکیبی جدیدی در منطق فازی انجام می‌شود. در سطح اول، برای رسیدگی به مساله انتخاب تأمین‌کننده پایدار، یک رویکرد ترکیبی جدید براساس منطق فازی اجرا می‌شود. برای رتبه‌بندی معیارها و زیرمعیارها رویکرد فرآیند تحلیل شبکه فازی (FANP)، برای شناسایی روابط بین معیارهای اصلی تکنیک DEMATEL، برای اولویت‌بندی تأمین‌کنندگان تکنیک TOPSIS و پس از اولویت‌بندی مراکز تأمین وزن‌های به‌دست‌آمده به شکل پارامتر در یک مدل ریاضی سه هدفه در نظر گرفته شدند. در سطح دوم، یک مدل ریاضی مختلط عدد صحیح خطی سه هدفه برای طراحی شبکه زنجیره تأمین با اهداف کمینه‌سازی کل هزینه‌های زنجیره، بیشینه‌سازی ارزش وزنی تولید با در نظر گرفتن اولویت‌های مراکز تأمین و بیشینه‌سازی پایایی زنجیره با رویکرد برنامه‌ریزی آرمانی وزنی در مطالعه موردی زنجیره تأمین لامپ ارائه شده است [۹]. فضلی خلف و همکاران، یک مدل ریاضی مختلط انعطاف‌پذیر احتمالی ۴ هدفه برای طراحی شبکه زنجیره تأمین هیدروژن سبز پایدار با استراتژی پایایی برای ایمنی شبکه در شرایط عدم قطعیت تحت ریسک اختلال ارائه کردند. اهداف این پژوهش کمینه‌سازی کل هزینه‌های زنجیره (اقتصادی)، کمینه‌سازی انتشار گازهای گل‌خانه‌ای (زیست محیطی)، بیشینه‌سازی مسئولیت اجتماعی و فرصت‌های شغلی (اجتماعی) و بیشینه‌سازی (پایایی) است [۳۹]. ژانگ و همکاران<sup>۱</sup>، یک مدل ریاضی مختلط عدد صحیح خطی مکان‌یابی-موجودی پایا برای طراحی شبکه زنجیره تأمین حلقه بسته در شرایط عدم قطعیت تحت ریسک اختلال احتمالی در تسهیلات مراکز توزیع در جریان رو به جلو و برگشتی شبکه ارائه کردند. اختلالات احتمالی تسهیلات مستقل از یکدیگر است و به نوع تسهیلات بستگی دارد [۵]. کریستس‌آنو و هلو<sup>۲</sup>، یک مدل ریاضی برای زمان‌بندی برنامه‌ریزی عملیاتی خط تولید محصولی ماژولار در زنجیره تأمین حلقه بسته تحت عدم قطعیت با اهداف کمینه‌سازی ضایعات و بیشینه‌سازی پایایی در استفاده مجدد محصول ارائه کردند. در این تحقیق برای تعیین ظرفیت تولید، باز تولید و برنامه‌ریزی عملیاتی خط تولید چندین سناریو در بازده تولید تحت عدم قطعیت بازده فرآیند در نظر گرفته و بررسی شده است. همچنین، بازسازی و ارتقا طراحی ماژولار در ماژول‌ها مناسب و در دوره‌های زمانی خاص نیز مورد بررسی قرار گرفته است [۴۰]. روسی و همکاران<sup>۳</sup>، یک مدل ریاضی خطی برای بهینه‌سازی زنجیره تأمین

<sup>4</sup> Aguila et al<sup>5</sup> Bevilacqua et al<sup>6</sup> Hsu et al<sup>7</sup> Allen et al<sup>1</sup> Zhang et al<sup>2</sup> Kristianto&Helo<sup>3</sup> Rossi et al

محصولی با در نظر گرفتن میزان انتشار گاز دی اکسید کربن طراحی کردند. در این پژوهش یک برنامه‌ریزی ریاضی فازی دو هدفه برای حداکثر کردن سود، حداقل کردن انتشار گاز دی اکسید کربن، حداکثر سازی سطح پاسخ به تقاضای مشتریان با رویکرد حل فراابتکاری توسعه و ارائه دادند [۴۸]. تساو و همکاران<sup>۴</sup>، در پژوهشی یک مدل برنامه‌ریزی ریاضی چند منظوره برای استفاده در طراحی شبکه زنجیره تامین پایدار در شرایط عدم قطعیت با یک روش تعاملی مبتنی بر برنامه نویسی تصادفی فازی و برنامه ریزی چند منظوره احتمالی فازی برای غلبه بر شرایط غیر قطعی ارائه کردند. اهداف مدل به حداکثر رساندن مزایای اجتماعی و به حداقل رساندن هزینه‌های اقتصادی و اثرات زیست محیطی است. توجه هم‌زمان به اهداف به تصمیم‌گیری در مورد انتخاب فناوری‌ها، مواد تولید، تعیین تعداد و مکان مراکز تولید، تعیین تعداد و مکان مراکز توزیع و مقدار محصول قابل حمل بین تأسیسات کمک می‌کند. عدم قطعیت مربوط به تقاضای مشتری با استفاده از متغیرهای تصادفی حل می‌شود، در حالی که هزینه‌های کلی انتشار کربن، فرصت‌های شغلی و اثرات مخرب راه حل‌های حاصله با استفاده از اعداد فازی مدیریت می‌شود. در نهایت، تجزیه و تحلیل عددی نشان دهنده کارایی مدل ارائه شده است [۴۹]. باگ‌هین و همکاران<sup>۵</sup>، یک مدل ریاضی مختلط غیرخطی با در نظر گرفتن عدم قطعیت فازی تصادفی و محدودیت شانس برای برنامه‌ریزی متمرکز یک زنجیره تامین ارائه کردند. زنجیره تامین این پژوهش دارای ۳ سطح شامل تامین کننده، تولیدکننده و توزیع کننده می‌باشد و معیارهای متفاوتی از منظر پایداری اجتماعی مورد مطالعه قرار گرفته است که یک کانال پیکارچه جهت تامین فیزیکی کالا، تولید و برنامه ریزی حمل و نقل از دیدگاه پایداری اجتماعی تحت عدم قطعیت بررسی شده است. در نهایت، کارایی مدل با استفاده از یک مطالعه موردی در صنعت نساجی مورد آزمون قرار گرفته است [۵۰]. بورگس و سالمونا<sup>۶</sup>، در پژوهشی اولویت بندی الزامات در زنجیره تامین نوع خاصی از صنایع مواد غذایی را مورد مطالعه قرار دادند. اولویت بندی بین ۱۷ الزام تعیین شده توسط کارشناسان، به روش فازی صورت گرفته است. تبادل مرتبط به پایداری در زمان واقعی در رتبه بندی، رتبه بالاتری خواهد داشت، زیرا در زنجیره‌های تامین مواد غذایی شاخص پایداری به طور فزاینده‌ای مورد توجه بوده است [۵۱]. دی و ساین<sup>۷</sup>، در پژوهشی مروری تحلیل کاربردهای فازی در زنجیره‌های تامین کشاورزی را بررسی کردند. منطق فازی، به دلیل توانایی در کنترل عدم قطعیت، در زمینه‌های مختلف مورد استفاده قرار می‌گیرد. این

یک مطالعه موردی در زنجیره تامین حلقه بسته تاسیسات تصفیه فاضلاب و واحدهای ذخیره آب شیرین مورد بررسی قرار گرفته است. نتایج پژوهش حاکی از مزایای استفاده از تولید ماژولار به صورت موازی با تولید محصول اصلی می‌باشد [۷]. بی‌هسکار و لراپتری<sup>۱</sup> در پژوهشی، چارچوبی برای بهینه‌سازی زنجیره تامین با استفاده از منطق ماژولار ارائه کردند و مزایای تولید ماژولار نظیر صرفه جویی در هزینه و انعطاف پذیری در فرآیند تولید بدلیل استفاده از ماژول‌های کوچک و استاندارد در انواع صنایع را مورد بررسی قرار دادند. در این مطالعه، مکان تاسیسات با استفاده از متغیرهای باینری و تعداد ماژول‌ها با استفاده از متغیرهای عدد صحیح نشان داده شده است. در نهایت، نتایج پژوهش نشان می‌دهد که با استفاده از این روش، تعادل بین مراکز مختلف زنجیره تامین و هزینه‌های آن‌ها ایجاد خواهد شد [۴۵]. بودی‌مان و رایو<sup>۲</sup>، یک مدل تصادفی دو مرحله‌ای برای طراحی شبکه زنجیره تامین جهانی با تمرکز روی مفاهیم ماژولار و استراتژی تأخیر<sup>۳</sup> با در نظر گرفتن عدم قطعیت تقاضا ارائه کردند. این مطالعه شامل برنامه ریزی چند دوره‌ای خرید، تولید و فروش چندین محصول با معماری ماژولار در یک زنجیره تامین عملیاتی می‌باشد. با توجه به پیچیدگی مدل، از روش تقریب متوسط نمونه استفاده شده است تا بتوان یک راه حل مطمئن و کارآمد را ارائه داد. این مطالعه نشان می‌دهد که تحت سطوح مختلف عدم اطمینان تقاضا، استراتژی‌های SP می‌توانند بهره‌وری عملیات زنجیره تامین را بهبود بخشند و در عین حال در کنترل تغییرات غیرمنتظره تقاضای نامطمئن پاسخگو باشند. پیکربندی زنجیره تامین با انتخاب استراتژی مناسب SP، سبب افزایش مقاومت و انعطاف پذیری شبکه زنجیره تامین در برابر خطرات عدم قطعیت تقاضای جهانی می‌شود [۴۶]. طلائی و همکاران، مدل برنامه ریزی عدد صحیح مختلط خطی دو هدفه برای طراحی شبکه زنجیره تامین حلقه بسته سبز با رویکرد بهینه سازی استوار فازی برای بررسی اثرات عدم قطعیت هزینه های متغیر و هم‌چنین میزان تقاضا تحت توابع هدف مربوط به نگرانی‌های اقتصادی و زیست محیطی ارائه کردند. در این شبکه زنجیره تامین حلقه بسته سبز چند محصولی محل تسهیلات/مدل تخصیص شامل مراکز تولیدی، مراکز بازسازی، مراکز جمع‌آوری، مراکز جمع‌آوری/بازرسی، مراکز دفع و بازارها مورد بررسی قرار گرفته شده است. در این مطالعه، حل مدل و بررسی نتایج با رویکرد ε- محدودیت فازی انجام شده است [۴۷]. سلیمانی و همکاران، در پژوهشی یک شبکه زنجیره تامین سبز حلقه بسته چند

<sup>4</sup> Tsao et al

<sup>5</sup> Yaghin et al

<sup>6</sup> Burgess et al

<sup>7</sup> De&Singh

<sup>1</sup> Bhosekar&Ierapetrinou

<sup>2</sup> Budiman&Rau

<sup>3</sup> Speculation-Postponement

گرفتن مقیاس تاب‌آوری و پاسخ‌گویی ارائه کردند. اهداف مدل شامل حداقل کردن کل هزینه‌ها و آسیب‌های زیست محیطی در کنار حداکثر کردن تأثیرات اجتماعی شامل سطح پاسخ‌گویی و تاب‌آوری شبکه زنجیره تأمین می‌باشد. یک نسخه بهبود یافته از رویکرد بهینه‌سازی تصادفی فازی برای مواجهه با داده‌های نامشخص فازی ناشی از فضای کسب و کار پویا ارائه شده است. علاوه بر این در این پژوهش، نسخه جدیدی از برنامه‌ریزی آرمانی به نام برنامه‌ریزی چند هدفه فراآرمانی برای حل مدل چند هدفه توسعه داده شده است [۵۵]. در این بخش، مقالات زنجیره تأمین در مباحث پایایی، محصولات ماژولار و عدم قطعیت بررسی شده است. بر اساس بررسی انجام شده در این بخش، طراحی شبکه زنجیره تأمین با محصولات ماژولار اخیراً مورد توجه محققین قرار گرفته است که اهداف مهمی هم‌چون ارتقا پاسخ‌گویی و رضایت‌مندی مشتری را به همراه دارد. بکارگیری رویکرد پایایی در طراحی شبکه زنجیره تأمین با محصولات ماژولار موضوعی نوین است که در بسیار از صنایع در شرایط عدم قطعیت تحت اختلال مورد توجه قرار گرفته است با توجه به ایده ارزشمند این پژوهش شرایط لازم برای ایجاد زمینه‌های پژوهشی بیشتر فراهم خواهد شد.

### ۳- تعریف مسئله

در این تحقیق، بر اساس یک مدل ریاضی تصادفی فازی امکانی احتمالی دو هدفه یک زنجیره تأمین تولید و باز تولید ماژولار<sup>۲</sup> در ۶ سطح اصلی طراحی شده است. در سطح اول، تأمین‌کنندگان قطعات یا ماژول‌های مورد نیاز برای تولید قرار دارند. در سطح ۲، کارخانه‌ها یا مراکز تولید محصولات قرار دارند که هر کدام می‌توانند یک یا چند نوع محصول در زنجیره تولید کنند و محصول تولیدی آن‌ها می‌تواند مستقیماً به مشتریان توزیع شود و یا در مراکز بازرسی با کنترل کیفیت، سالم بودن محصول تضمین می‌شود. در سطح ۳، مراکز ارزیابی قرار می‌گیرند که در هر مرکز، کیفیت و درستی (سالم بودن) هر محصول کنترل می‌شود و در صورت تایید سالم بودن، به بازار مشتریان ارسال می‌شود و در غیر این صورت، به مرکز تعمیر/احیاء<sup>۳</sup> فرستاده خواهد شد. در سطح ۴ این زنجیره، مراکز تعمیر قرار دارند که اولین سطح از بخش برگشتی زنجیره به حساب می‌آیند و در این مراکز به تعمیر یا اصلاح جزئی محصولات دریافتی از مراکز ارزیابی پرداخته می‌شود، که در صورت تعمیر پذیر بودن، تعمیر و به مشتریان

مطالعه، کاربردهای فازی در زنجیره تأمین کشاورزی را با توجه به عدم قطعیت‌هایی نظیر شرایط زمین، تکنیک‌های تولید، آبیاری، کمبودهای ذخیره سازی در سردخانه، حمل و نقل، مدیریت زباله، مسائل زیست محیطی، پایداری و مدیریت خشکسالی بررسی و یک چارچوب یکپارچه را ایجاد می‌کند. نتایج پژوهش آن‌ها نشان می‌دهد با استفاده از برنامه‌های فازی مشترک با کلان داده‌ها و GIS و با شبیه‌سازی‌های قوی‌تر الگوریتم‌های ابتکاری و فراابتکاری در این نوع زنجیره تأمین مدل‌های مستحکم‌تری قابل ارائه است [۵۲]. لیما و همکاران<sup>۱</sup>، در پژوهش خود مدل ریاضی مختلط خطی جهت برنامه ریزی زنجیره تأمین در صنایع پایین دستی نفتی با در نظر گرفتن عدم قطعیت در هزینه‌های تأمین و مقدار تقاضا ارائه کردند. این مدل با پارامترهای غیرقطعیتی نوع فازی با استفاده از روش CCP بررسی شده است. طراحی این شبکه زنجیره تأمین و برنامه‌ریزی توزیع محصول با مد نظر قرار دادن روشی که حداقل هزینه را شامل می‌شود پایه گذاری شده است. در این پژوهش یک مطالعه موردی در صنایع نفت کشور برزیل مورد اعتبار سنجی و تایید قرار گرفته است. ابزاری قدرتمند جهت مدیریت فرآیند تصمیم‌گیری در برنامه‌ریزی استراتژیک و فنی جهت حل مسائل دنیای واقعی در این پژوهش ارائه شده است [۵۳]. خلیلی ناصر و همکاران، یک مدل ریاضی مختلط خطی چند هدفه برای طراحی زنجیره تأمین حلقه بسته پایدار چند دوره‌ای، چند محصولی با در نظر گرفتن مسیریابی مکان‌یابی، زمان بندی خودروها و تخفیف کمی ارائه کردند. زنجیره‌های تأمین حلقه بسته پایدار به منظور به حداقل رساندن ضایعات با استفاده از تعمیر، فروش مجدد یا بازتولید محصولاتی که از زنجیره تأمین خارج شده اند، طراحی می‌شوند. به حداکثر رساندن ارزش منابع و تولید ضایعات کمتر که از تصمیمات استراتژیک تأثیرگذار بر پایداری و مزیت رقابتی زنجیره تأمین است، در این پژوهش مورد توجه قرار گرفته است. این پژوهش یک روش جدید فازی دو مرحله‌ای را جهت انتخاب تأمین‌کننده و تخصیص سفارش در زنجیره تأمین ارائه می‌دهد. در مرحله اول، از روش فازی بهترین-بدترین برای انتخاب تأمین‌کنندگان استفاده شده است. در مرحله دوم، از برنامه‌ریزی چند هدفه مختلط خطی عدد صحیح برای طراحی شبکه زنجیره تأمین استفاده شده است. اهداف مدل شامل حداقل کردن هزینه‌های شبکه، تأثیرات محیطی ناخواسته و فروش از دست رفته و حداکثر کردن فرصت‌های کسب و کار و خریداران پایدار می‌باشد. جهت حل مدل چند هدفه از برنامه ریزی آرمانی فازی استفاده شده است [۵۴]. نیری و همکاران، یک مدل برنامه‌ریزی مختلط عدد صحیح چند هدفه را جهت طراحی یک زنجیره تأمین پایدار با در نظر

<sup>۲</sup> Manufacturing Remanufacturing Supply Chain Network Design (MRSCND)

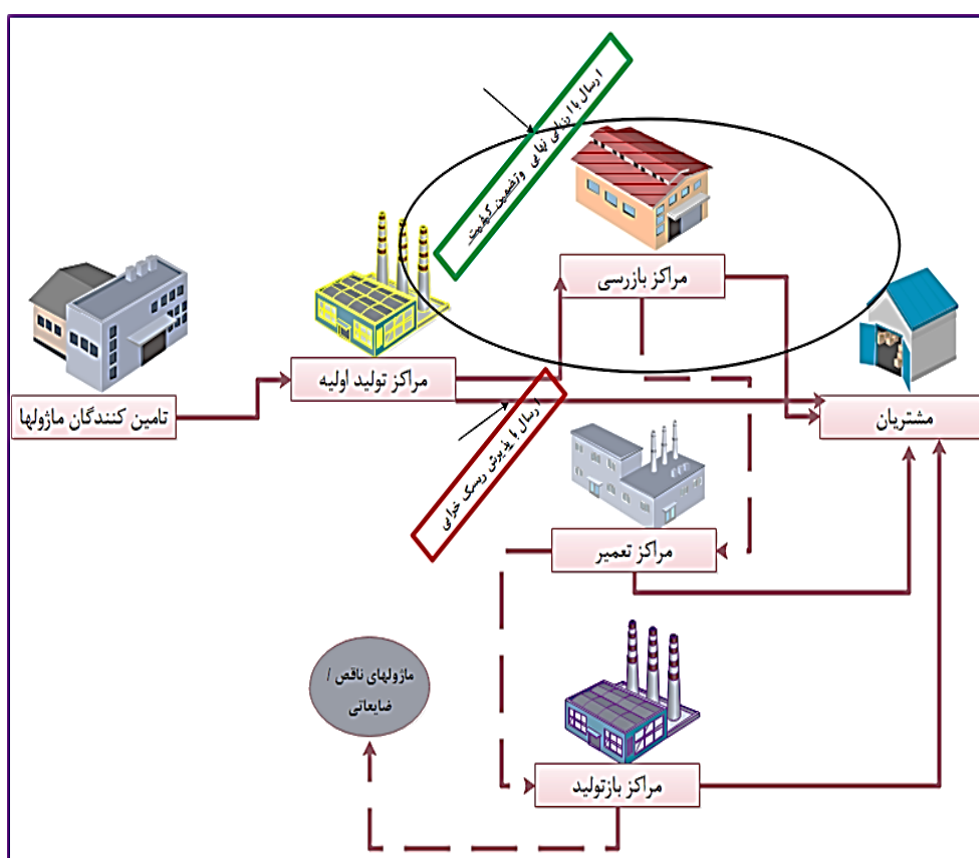
<sup>۳</sup> Repair/Refurbishing Center

<sup>۱</sup> Lima et al

شرایط، محصولاتی که به مشتریان می‌رسد ممکن است خرابی داشته باشند ولی قطعاً هزینه ارزیابی از زنجیره کاسته شده است. از این رو، برای کنترل کیفیت محصولات ارسالی به مشتریان و حفظ اعتماد آن‌ها، یک تابع هدف دیگر در کنار تابع هدف هزینه تعریف شده است که به حداقل‌سازی تعداد محصولاتی می‌پردازد که کیفیت آن‌ها در مراکز ارزیابی کنترل نشده است. هم‌چنین، مقدار متوسط انتظار محصولات خراب برای هر مشتری محاسبه می‌شود. قابلیت اطمینان، تضمین کیفیت و سالم بودن محصولات عرضه شده به هر مشتری با اعمال قیدی از یک حد مشخصی کمتر نمی‌باشد.

ارسال می‌شود و در غیر این صورت، به مراکز تولید مجدد فرستاده می‌شود. در سطح ۵ نیز مراکز تولید مجدد قرار دارند که در آن عملیات اصلاح کامل و به طور کلی باز تولید محصولات بازگشتی صورت می‌پذیرد و به تفکیک قطعات، جداسازی قطعات ناقص یا اضافه کردن قطعه جدید و نهایتاً رفع نقص و باز تولید محصول مورد تایید پرداخته می‌شود. نهایتاً در سطح ۶، مشتریان محصولات در مکان‌های مختلف در نظر گرفته شده است.

در این زنجیره، عبور از مرکز ارزیابی الزامی نیست و انتقال مستقیم محصول از کارخانه به مشتریان وجود دارد. در این



شکل (۱). ساختار شبکه زنجیره تامین تولید و باز تولید ماژولار

- ✓ برای احداث مراکز ارزیابی، تعمیر و بازتولید، چندین اندازه ظرفیت در نظر گرفته می‌شود. (به عنوان مثال، یک مرکز تعمیر می‌تواند در اندازه کوچک، متوسط یا بزرگ احداث شود)
- ✓ ارسال محصول به مشتری یا مستقیماً از مراکز تولید اولیه صورت می‌گیرد که ریسک عدم کنترل کیفیت دارد، یا از مراکز بازرسی به آن‌ها توزیع می‌شود که تضمین کیفیت دارد و یا از مراکز بازرسی تایید نشده و بعد از تعمیر و یا بازتولید با تضمین کیفیت به مشتریان عرضه می‌شود.

مهم‌ترین مفروضات در مدل‌سازی و حل این مساله، عبارت است از:

- ✓ مکان‌های بالقوه برای تولید، مراکز ارزیابی، تعمیر و بازتولید از پیش مشخص است و در هر مرکز، حداکثر یک تسهیل از هر نوع قرار می‌گیرد.
- ✓ تامین‌کنندگان ماژول‌ها شناخته شده و مشخص هستند.
- ✓ کمبود مجاز نیست و تمام تقاضای مشتریان باید عرضه شود.



$A$	مجموعه مراکز ارزیابی	✓	نرخ تایید سالم بودن محصولات در مراکز ارزیابی به صورت تقریبی است و با اعداد فازی بیان می‌شود.
$R$	مجموعه مراکز تعمیر	✓	نرخ تعمیر یا اصلاح پذیری محصولات دریافتی مراکز تعمیر به صورت تقریبی است و با اعداد فازی بیان می‌شود.
$K$	مجموعه مراکز بازتولید	✓	نرخ باز تولید محصولات دریافتی مراکز باز تولید به صورت تقریبی است و با اعداد فازی بیان می‌شود.
$C$	مجموعه بازارهای/مشتریان متقاضی محصولات	✓	هزینه تدارکات اولیه به صورت فازی بیان می‌شود و امید ریاضی فازی آن‌ها در تابع هدف لحاظ می‌شود.
$I$	مجموعه سناریوها	✓	ظرفیت تأمین‌کنندگان ماژول‌ها به صورت تقریبی است و با اعداد فازی بیان می‌شود.
$U$	مجموعه سطح ظرفیت برای احداث تسهیلات	✓	تقاضا به صورت تقریبی است و با اعداد فازی بیان می‌شود.

#### ۴-۲- پارامترها

$fS_{sm}$	هزینه ثابت اخذ قرارداد <sup>۲</sup> با تأمین‌کننده $s$ برای تأمین ماژول $m$ مورد نیاز تولید-کنندگان	✓	تقاضا به صورت تقریبی است و با اعداد فازی بیان می‌شود.
$fA_{au}$	هزینه ثابت احداث مرکز ارزیابی در مکان $a$ با اندازه ظرفیت $u$	✓	محصولات بازتولیدی، در خود مرکز ارزیابی می‌شوند و مستقیماً به مشتریان عرضه می‌شوند.
$fR_{ru}$	هزینه ثابت احداث مرکز تعمیر در مکان $r$ با اندازه ظرفیت $u$	✓	در مراکز تولید و بازتولید، امکان تولید/بازتولید هر نوع محصول موجود است (البته با ملاحظات ظرفیت محدود است)
$fK_{ku}$	هزینه ثابت احداث مرکز بازتولید در مکان $k$ با اندازه ظرفیت $u$	✓	قطعات یا ماژول‌های غیرقابل استفاده مراکز بازتولید را می‌توان فروخت و ارزش <sup>۱</sup> به دست آورد.
$\widetilde{pC_{sfm}}$	هزینه واحد تداکارت برای خرید و ارسال قطعات از تأمین‌کننده $s$ به مرکز تولید $f$ برای ماژول نوع $m$ در شرایط فازی		

#### ۴-۳- مدل‌سازی ریاضی

$mc_{pf}$	هزینه واحد تولید محصول $p$ در مرکز تولید $f$		
$ac_{pa}$	هزینه واحد ارزیابی و کنترل کیفیت محصول $p$ در مرکز ارزیابی $a$		
$rc_{pr}$	هزینه واحد تعمیر و اصلاحات جزئی محصول $p$ در مرکز تعمیر $r$		
$rmc_{pk}$	هزینه واحد پردازش محصولات ناسالم غیر قابل اصلاح $p$ دریافتی مرکز $k$ برای باز تولید		
$tr_{pfa}^{F \rightarrow A}$	هزینه واحد حمل و نقل محصول $p$ از مرکز تولید $f$ به مرکز ارزیابی $a$		
$tr_{pfa}^{F \rightarrow A}$	هزینه واحد حمل و نقل محصول $p$ از مرکز تولید $f$ به بازار مشتری $c$		
$tr_{pac}^{A \rightarrow C}$	هزینه واحد حمل و نقل محصول $p$ از مرکز ارزیابی $a$ به بازار مشتری $c$		
$tr_{par}^{A \rightarrow R}$	هزینه واحد حمل و نقل محصول $p$ از مرکز ارزیابی $a$ به مرکز تعمیر $r$		

#### ۴-۱- مجموعه‌ها

$S$	مجموعه تأمین‌کنندگان ماژول‌ها
$M$	مجموعه ماژول‌ها
$P$	مجموعه محصولات
$F$	مجموعه مراکز تولید موجود

<sup>2</sup> Contract Establishing

<sup>1</sup> Salvage Value

فازی		هزینه واحد حمل و نقل محصول $p$ از مرکز تعمیر $r$ به بازار مشتری $c$	$tr_{prc}^{R \rightarrow C}$
$\gamma$ حداقل قابلیت اعتماد (کنترل کیفیت و تضمین سالم بودن) محصولات تحویلی به هر مشتری		هزینه واحد حمل و نقل محصول $p$ از مرکز تعمیر $r$ به مرکز بازتولید $k$	$tr_{prk}^{R \rightarrow K}$
$dis_{si}$ درصد ظرفیت مختل شده تامین کننده ماژول $s$ با توجه به سناریو $i$		هزینه واحد حمل و نقل محصول $p$ از مرکز بازتولید $k$ به بازار / مشتری $c$	$tr_{pkc}^{K \rightarrow C}$
$rob_i$ احتمال وقوع سناریو $i$		ارزش حاصل از فروش قطعات/ماژول های $m$ که در مراکز بازتولید قابل استفاده نیستند.	$sv_m$
<b>۴-۳- متغیر تصمیم</b>			
$X_{sm}^S$ اگر با تامین کننده $s$ برای تامین ماژول $m$ قرار داد بسته برابر با ۱، در غیر این صورت ۰ است.		ظرفیت تامین کننده $s$ در عرضه ماژول $m$ در شرایط فازی	$\widehat{cap}_{sm}^S$
$X_{au}^A$ اگر در مکان $a$ مرکز ارزیابی در سطح $u$ احداث شود برابر با ۱، در غیر این صورت ۰ است.		ظرفیت مرکز تولید $f$ در تولید محصولات مختلف	$cap_f^F$
$X_{ru}^R$ اگر در مکان $r$ مرکز تعمیر در سطح $u$ احداث شود برابر با ۱، در غیر این صورت ۰ است.		ظرفیت هر مرکز ارزیابی در صورت احداث در اندازه $u$	$cap_u^A$
$X_{ku}^K$ اگر در مکان $k$ مرکز بازتولید در سطح $u$ احداث شود برابر با ۱، در غیر این صورت ۰ است.		ظرفیت هر مرکز تعمیر در صورت احداث در اندازه $u$	$cap_u^R$
$Y_{msfi}$ مقدار جریان ماژول نوع $m$ از تامین کننده $s$ به مرکز تولید $f$ با توجه به سناریو $i$		ظرفیت هر مرکز بازتولید در صورت احداث در اندازه $u$	$cap_u^K$
$V_{fpi}$ مقدار تولید مرکز تولید $f$ از محصول نوع $p$ با توجه به سناریو $i$		نرخ مصرف ظرفیت مراکز تولید به ازای هر واحد پردازش محصول $p$	$\lambda_p^F$
$Q_{pfa}^{F \rightarrow A}$ مقدار جریان محصول $p$ از مرکز تولید $f$ به مرکز ارزیابی $a$ با توجه به سناریو $i$		نرخ مصرف ظرفیت مراکز ارزیابی به ازای هر واحد ارزیابی محصول $p$	$\lambda_p^A$
$Q_{pfc}^{F \rightarrow C}$ مقدار جریان محصول $p$ از مرکز تولید $f$ به بازار / مشتری $c$ با توجه به سناریو $i$		نرخ مصرف ظرفیت مراکز تعمیر به ازای هر واحد تعمیر (اصلاح جزئی) محصول $p$	$\lambda_p^R$
$Q_{paci}^{A \rightarrow C}$ مقدار جریان محصول $p$ از مرکز ارزیابی $a$ به بازار / مشتری $c$ با توجه به سناریو $i$		نرخ مصرف ظرفیت مراکز بازتولید به ازای هر واحد پردازش و باز تولید محصول $p$	$\lambda_p^K$
$Q_{pari}^{A \rightarrow R}$ مقدار جریان محصول $p$ از مرکز ارزیابی $a$ به مرکز تعمیر $r$ با توجه به سناریو $i$		مقدار تقاضای بازار $c$ برای محصول $p$ در شرایط فازی	$\widehat{dem}_{cp}^C$
$Q_{prci}^{R \rightarrow C}$ مقدار جریان محصول $p$ از مرکز تعمیر $r$ به بازار / مشتری $c$ با توجه به سناریو $i$		تعداد ماژول نوع $m$ مورد نیاز برای تولید هر واحد محصول $p$	$r_{mp}$
$Q_{prki}^{R \rightarrow K}$ مقدار جریان محصول $p$ از مرکز تعمیر $r$ به مرکز بازتولید $k$ با توجه به سناریو $i$		نرخ اطمینان (سالم بودن یا عدم خرابی) محصول $p$ تولید شده در شرایط فازی	$\widehat{\alpha}_p$
$Q_{pkci}^{K \rightarrow C}$ مقدار جریان محصول $p$ از مرکز بازتولید $k$ به بازار / مشتری $c$ با توجه به سناریو $i$		نرخ تعمیرپذیری (قابل اصلاح جزئی بودن) محصول $p$ در شرایط فازی	$\widehat{\beta}_p$
		نرخ بازتولید (اصلاح کلی) محصول $p$ در شرایط	$\widehat{\theta}_p$

در قسمت ششم به ترتیب هزینه‌های تولید، ارزیابی، تعمیر و باز تولید محاسبه شده است.

$$VC = \sum_i prob_i \left( \left[ \sum_f \sum_p mc_{pfi} V_{fpi} \right] + \left[ \sum_f \sum_a \sum_p ac_{pfa} Q_{pfa}^{F \rightarrow A} \right] + \left[ \sum_a \sum_r \sum_p rc_{pra} Q_{pra}^{A \rightarrow R} \right] + \left[ \sum_r \sum_k \sum_p rmc_{prk} Q_{prk}^{R \rightarrow K} \right] \right) \quad (6-1)$$

در قسمت هفتم هزینه‌های حمل و نقل محاسبه شده است.

$$TC = \sum_i prob_i \left( \left[ \sum_p \sum_f \sum_a tr_{pfa}^{F \rightarrow A} Q_{pfa}^{F \rightarrow A} \right] + \left[ \sum_p \sum_f \sum_c tr_{pfc}^{F \rightarrow C} Q_{pfc}^{F \rightarrow C} \right] + \left[ \sum_p \sum_a \sum_a tr_{pac}^{A \rightarrow C} Q_{pac}^{A \rightarrow C} \right] + \left[ \sum_p \sum_a \sum_r tr_{par}^{A \rightarrow R} Q_{par}^{A \rightarrow R} \right] + \left[ \sum_p \sum_r \sum_c tr_{prc}^{R \rightarrow C} Q_{prc}^{R \rightarrow C} \right] + \left[ \sum_p \sum_r \sum_k tr_{prk}^{R \rightarrow K} Q_{prk}^{R \rightarrow K} \right] + \left[ \sum_p \sum_k \sum_c tr_{pkc}^{K \rightarrow C} Q_{pkc}^{K \rightarrow C} \right] \right) \quad (7-1)$$

در قسمت هشتم ارزش فروش ماژول‌های ناقص محاسبه شده است.

$$VAC = \sum_i prob_i \left[ \sum_m \sum_k sv_m W_{mki} \right] \quad (8-1)$$

تابع هدف دوم، هدفی مشتری محور بر اساس کنترل کیفیت است که بر اساس آن مقدار عرضه مستقیم محصول از کارخانه به مشتریان حداقل می‌شود. به عبارت دیگر، از طریق مراکز ارزیابی و کنترل کیفیت، قابلیت اطمینان، تضمین کیفیت و سالم بودن محصولات عرضه شده به مشتریان حداکثر می‌شود.

بازار/ مشتری  $c$  با توجه به سناریو  $i$

$G_{pki}$  مقداری از تولید محصول  $p$  که به دلیل عدم تعمیر و باز تولید از خط تولید به طور کلی خارج شده است (با توجه به سناریو  $i$ )  
 $W_{mki}$  مقدار کل قطعات/ماژول نوع  $m$  که به دلیل نقص در مرکز باز تولید  $k$  قابل استفاده نیستند (با توجه به سناریو  $i$ )

#### ۴-۴- توابع هدف

تابع هدف اول، هدف اقتصادی مدل است که مجموع هزینه‌ها کمینه می‌شود.

$$MIN Obj_1 = OCF + AF + RF + KF + SF + VC + TC - VAC \quad (1)$$

مجموع هزینه‌های این زنجیره شامل ۱۱ قسمت است. در قسمت اول هزینه ثابت اخذ قرارداد با تأمین‌کنندگان ماژول‌ها محاسبه شده است.

$$OCF = \left[ \sum_s \sum_m f S_{sm} X_{sm}^S \right] \quad (1-1)$$

در قسمت دوم هزینه ثابت احداث مراکز ارزیابی محاسبه شده است.

$$AF = \left[ \sum_a \sum_u f A_{au} X_{au}^A \right] \quad (2-1)$$

در قسمت سوم هزینه ثابت احداث مراکز تعمیر محاسبه شده است.

$$RF = \left[ \sum_a \sum_u f R_{ru} X_{ru}^R \right] \quad (3-1)$$

در قسمت چهارم هزینه ثابت احداث مراکز باز تولید محاسبه شده است.

$$KF = \left[ \sum_k \sum_u f K_{ku} X_{ku}^K \right] \quad (4-1)$$

در قسمت پنجم هزینه تدارکات و تأمین ماژول‌ها محاسبه شده است.

$$SF = \sum_i prob_i \left[ \sum_s \sum_f \sum_m \widehat{pc}_{sfm} Y_{msfi} \right] \quad (5-1)$$

$$W_{mki} = \sum_p r_{mp} G_{pki} \quad (16)$$

$$\forall k \in K, p \in P, i \in I$$

$$\sum_f Q_{pfci}^{F \rightarrow C} + \sum_a Q_{paci}^{A \rightarrow C} + \sum_r Q_{prci}^{R \rightarrow C} + \sum_k Q_{pkci}^{K \rightarrow C} = \widetilde{dem}_{cp}^C \quad (17)$$

$$\forall c \in C, p \in P, i \in I$$

$$\frac{\sum_a Q_{paci}^{A \rightarrow C} + \sum_r Q_{prci}^{R \rightarrow C} + \sum_k Q_{pkci}^{K \rightarrow C}}{\sum_c Q_{pfci}^{F \rightarrow C} + \sum_a Q_{paci}^{A \rightarrow C} + \sum_r Q_{prci}^{R \rightarrow C} + \sum_k Q_{pkci}^{K \rightarrow C}} \geq \gamma \quad (18)$$

$$\forall c \in C, p \in P, i \in I$$

$$\sum_c Q_{paci}^{A \rightarrow C} = \widetilde{\alpha}_p \sum_f Q_{pfai}^{F \rightarrow A} \quad (19)$$

$$\forall a \in A, p \in P, i \in I$$

$$\sum_c Q_{prci}^{R \rightarrow C} = \widetilde{\beta}_p \sum_a Q_{pari}^{A \rightarrow R} \quad (20)$$

$$\forall r \in R, p \in P, i \in I$$

$$\sum_c Q_{pkci}^{K \rightarrow C} = \widetilde{\theta}_p \sum_r Q_{prki}^{R \rightarrow K} \quad (21)$$

$$\forall k \in K, p \in P, i \in I$$

$$X_{sm}^S, X_{au}^A, X_{ru}^R, X_{ku}^K \in \{0,1\}$$

$$Y_{msfi}, V_{fpi}, G_{pki}, W_{mki} \geq 0 \quad (22)$$

$$Q_{prci}^{R \rightarrow C}, Q_{prki}^{R \rightarrow K}, Q_{pkci}^{K \rightarrow C} \geq 0$$

$$Q_{pfai}^{F \rightarrow A}, Q_{pfci}^{F \rightarrow C}, Q_{paci}^{A \rightarrow C}, Q_{pari}^{A \rightarrow R} \geq$$

رابطه (۳)، ظرفیت محدود تامین کنندگان ماژول‌ها را نشان می‌دهد. لازم به توضیح است که سفارش ماژول، مستلزم اخذ قرارداد با تامین کنندگان قطعات است. محدودیت (۴) نشان می‌دهد، ظرفیت هر مرکز تولید کنترل می‌شود. محدودیت (۵) نشان می‌دهد، ظرفیت هر مرکز ارزیابی کنترل می‌شود. محدودیت (۶) نشان می‌دهد، ظرفیت هر مرکز تعمیر کنترل می‌شود. محدودیت (۷) نشان می‌دهد، ظرفیت هر مرکز بازتولید کنترل می‌شود. محدودیت‌های (۸)، (۹) و (۱۰) نشان می‌دهند، در هر مکان بالقوه برای احداث مراکز ارزیابی، تعمیر و باز تولید حداکثر یک مرکز با یک سطح ظرفیت مشخص می‌تواند احداث گردد. محدودیت (۱۱)، نیاز به هر نوع ماژول برای تولید محصولات در هر مرکز تولید را تضمین می‌کند. محدودیت (۱۲)،

$$MIN Obj_2 = \sum_i prob_i \left( \sum_p \sum_f \sum_c Q_{pfci}^{F \rightarrow C} \right) \quad (2)$$

۴-۵- محدودیت‌ها

$$\sum_f Y_{msfi} \leq \widetilde{cap}_{sm}^S X_{sm}^S (1 - dis_{si}) \quad (3)$$

$$\forall m \in M, s \in S, i \in I$$

$$\sum_p \lambda_p^F V_{fpi} \leq cap_f^F \quad \forall f \in F, i \in I \quad (4)$$

$$\sum_f \sum_p \lambda_p^A Q_{pfai}^{F \rightarrow A} \leq \sum_u cap_u^A X_{au}^A \quad (5)$$

$$\forall a \in A, i \in I$$

$$\sum_a \sum_p \lambda_p^R Q_{pari}^{A \rightarrow R} \leq \sum_u cap_u^R X_{ru}^R \quad (6)$$

$$\forall r \in R, i \in I$$

$$\sum_r \sum_p \lambda_p^K Q_{prki}^{R \rightarrow K} \leq \sum_u cap_u^K X_{ku}^K \quad (7)$$

$$\forall k \in K, i \in I$$

$$\sum_u X_{au}^A \leq 1 \quad \forall a \in A \quad (8)$$

$$\sum_u X_{ru}^R \leq 1 \quad \forall r \in R \quad (9)$$

$$\sum_u X_{ku}^K \leq 1 \quad \forall k \in K \quad (10)$$

$$\sum_p r_{mp} V_{fpi} = \sum_i Y_{msfi} \quad (11)$$

$$\forall m \in M, f \in F, i \in I$$

$$V_{fpi} = \sum_a Q_{pfai}^{F \rightarrow A} + \sum_c Q_{pfci}^{F \rightarrow C} \quad (12)$$

$$\forall f \in F, p \in P, i \in I$$

$$\sum_f Q_{pfai}^{F \rightarrow A} = \sum_r Q_{pari}^{A \rightarrow R} + \sum_c Q_{paci}^{A \rightarrow C} \quad (13)$$

$$\forall a \in A, p \in P, i \in I$$

$$\sum_a Q_{pari}^{A \rightarrow R} = \sum_k Q_{prki}^{R \rightarrow K} + \sum_c Q_{prci}^{R \rightarrow C} \quad (14)$$

$$\forall r \in R, p \in P, i \in I$$

$$\sum_r Q_{prki}^{R \rightarrow K} = \sum_c Q_{pkci}^{K \rightarrow C} + G_{pki} \quad (15)$$

$$\forall k \in K, p \in P, i \in I$$

## ۵- پایایی

یک سیستم پایا است که در صورت رخداد اختلال و از کار افتادن قسمت یا قسمت‌هایی از آن توانایی انجام وظایف خود را داشته باشد [۵۶]. به عبارت دیگر، پایایی یک سیستم که در یک بازه زمانی معلوم متشکل از اجزای مختلفی است، بر اساس ساختار آن سیستم و قابلیت اطمینان تک تک اجزای تشکیل دهنده آن محاسبه می‌شود. قابلیت اطمینان هر جز آن سیستم عبارت است از احتمال عدم رخداد اختلال در بازه زمانی مورد نظر در آن قسمت تا آن جز سیستم بتواند وظایف خود را انجام بدهد [۵۷].

اسنایدر و داسکین در مقاله سال ۲۰۰۷ مدلی برای طراحی زنجیره‌های پایا ارائه کردند [۲۲]. فرض شود که  $S$  مجموعه‌ای از سناریوهای محتمل از خرابی یا شکست تسهیلات  $P_j$  باشد. احتمال خرابی تسهیلات  $j$  باشد و خرابی‌های تسهیلات  $j$  در سیستم به یکدیگر وابسته باشند. احتمال رخداد خرابی در تسهیلات  $j$  از مجموعه  $A_s$  به صورت زیر است:

$$q_s = \prod_{j \in A_s} P_j \prod_{j \in \bar{A}_s} (1 - P_j) \quad (24)$$

اسنایدر و داسکین در این مقاله مدلی برای حداقل‌سازی هزینه‌های ثابت و انتقال با مدل‌سازی مبتنی بر سناریو ارائه کردند. اگر متغیرهای  $X_j$ ،  $Y_{ijs}$  و  $a_{ijs}$  متغیرهای باینری برای بازگشایی تسهیلات، اختصاص تقاضای مشتری به تسهیلات و مختل شدن تسهیلات باشد. محدودیت پایایی مدل به صورت رابطه ۲۵ است:

$$Y_{ijs} \leq (1 - a_{ijs}) \cdot X_j \quad (25)$$

در این پژوهش بر اساس مقاله اسنایدر و داسکین محدودیت ۳ برای پایایی مدل توسعه داده شده است. تسهیلات مختل شده با توجه به میزان اختلال با درصدی از ظرفیت خود در حال ارائه خدمات است.

## ۶- رویکرد بهینه‌سازی و حل

### ۶-۱- رویکرد امکانی و استوارسازی

گرچه معمولاً در اکثر پارامترهای مسائل بهینه‌سازی واقعی قطعیت کامل وجود ندارد، اما عدم قطعیت در برخی از پارامترها بسیار مشهودتر است و در صورت کنترل نشدن آن‌ها ممکن است جواب ارائه شده کارایی چندانی نداشته باشد. در این تحقیق پارامترهایی هم چون نرخ خرابی، تعمیرپذیری، بازتولید و تقاضا، غیرقطعی هستند که در مفروضات به صورت اعداد فازی در نظر گرفته شده‌اند. برای کنترل عدم قطعیت پارامترهای غیرقطعی مسئله، این پارامترها با توجه به نظر خبرگان و داده‌های تاریخی، به یک مجموعه دوزنقه‌ای شکل محدود می‌شود که اصطلاحاً عدد

تعادل ۱ مقدار تولید و جریان خروجی از هر کارخانه تولیدی را تضمین می‌کند. محدودیت (۱۳)، تعادل مقدار جریان ورودی و خروجی از هر مرکز ارزیابی را تضمین می‌کند. محدودیت (۱۴)، تعادل مقدار جریان ورودی و خروجی از هر مرکز تعمیر را تضمین می‌کند.

محدودیت (۱۵)، تعادل مقدار جریان ورودی و خروجی از هر مرکز باز تولید را تضمین می‌کند. محدودیت (۱۶)، تعداد مازول‌های ناقص که در مراکز بازتولید قابل استفاده نیستند، محاسبه می‌کند. محدودیت (۱۷)، قید ارضاء تأمین تقاضا مشتریان است. لازم به توضیح است که مقدار  $\sum_c Q_{pfc}^{F \rightarrow C}$  بخشی از تقاضای عرضه شده به مشتری است که از مرحله ارزیابی، کنترل کیفیت و تضمین سالم بودن عبور نکرده است و دارای ریسک است. محدودیت (۱۸)، قابلیت اعتماد محصولات عرضه شده به هر مشتری را محاسبه و تضمین می‌کند که تضمین سالم بودن محصولات به اندازه  $\gamma\%$  است. لازم به ذکر است:

$$\sum_a Q_{paci}^{A \rightarrow C} + \sum_r Q_{prci}^{R \rightarrow C} + \sum_k Q_{pkci}^{K \rightarrow C}$$

عرضه شده به مشتری است که از طریق مراکز ارزیابی، تعمیر و یا بازتولید به آن‌ها تحویل داده شده است و کیفیت آن‌ها بررسی شده است و تضمین سالم بودن وجود دارد. محدودیت (۱۹)، مقدار جریان محصولات از هر مرکز ارزیابی را با در نظر گرفتن نرخ اطمینان یا سالم بودن محصولات محاسبه می‌کند.

محدودیت (۲۰)، مقدار جریان محصولات از هر مرکز تعمیر به مشتریان را بر اساس نرخ تعمیرپذیری محصولات خراب محاسبه می‌کند. محدودیت (۲۱)، مقدار جریان محصولات از هر مرکز بازتولید به مشتریان را بر اساس نرخ تولید مجدد محصولات ناقص محاسبه می‌شود. محدودیت (۲۲)، متغیرهای مثبت و باینری مدل و دامنه تغییرات آن‌ها را نشان می‌دهد.

### ۴-۶- خطی سازی مدل

با توجه به غیرخطی بودن محدودیت (۱۸)، این محدودیت به صورت رابطه ۲۳ خطی و بازنویسی می‌شود:

$$\sum_a Q_{paci}^{A \rightarrow C} + \sum_r Q_{prci}^{R \rightarrow C} + \sum_k Q_{pkci}^{K \rightarrow C} \geq \gamma \left( \sum_c Q_{pfc}^{F \rightarrow C} + \sum_a Q_{paci}^{A \rightarrow C} + \sum_r Q_{prci}^{R \rightarrow C} + \sum_k Q_{pkci}^{K \rightarrow C} \right) \quad (23)$$

$$\forall c \in C, p \in P, i \in I$$

<sup>۱</sup> Balance

مدل این تحقیق بر اساس رویکرد بهینه‌سازی استوار امکانی (RFP<sup>۴</sup>) از مقالات طلایی و همکاران [۴۷] استحکام یافته است. فرض کنید  $a, N, B$  بردارهای ضرایب قطعی هستند.  $c, f$  بردارهای مقادیر غیرقطعی بر اساس توزیع دوزنقه‌ای هستند. مدل در حالت دی‌فازی به صورت زیر است:

$$\min Z = a \cdot y + \frac{(c_{(1)} + c_{(2)} + c_{(3)} + c_{(4)})}{4} x \quad (۳۳)$$

$$s. t. \quad (۳۴)$$

$$Ax \geq (1 - p) \cdot f_{(3)} + p \cdot f_{(4)} \quad (۳۵)$$

$$\text{if } Ax \geq \tilde{F}$$

$$Ax \leq (1 - p) \cdot f_{(2)} - p \cdot f_{(1)} \quad (۳۶)$$

$$\text{if } Ax \leq \tilde{F}$$

$$Bx = 0 \quad (۳۷)$$

$$s. x \leq N \cdot y \quad (۳۸)$$

$$x \geq 0, y \in \{0,1\} \quad (۳۹)$$

اگر  $\psi_1, \psi_2 > 0$  امکان استواری جواب،  $\eta$  امکان بهینگی جواب،  $0.5 \leq p \leq 1$  درجه اعتبار برقرار قیود فازی و  $Z_{max}$  بدترین مقدار هدف است. شکل استوار شده هدف در مدل به صورت زیر است:

$$\min Z = E[Z] + \eta \cdot [Z_{max} - E[Z]] + \psi_1 \cdot (f_{(4)} - (1 - p) \cdot f_{(3)} + p \cdot f_{(4)}) \quad (۴۰)$$

$$+ \psi_2 \cdot ((1 - p) \cdot f_{(2)} + p \cdot f_{(1)} - f_1) \quad (۴۱)$$

$$Z_{max} = f \cdot y + c_{(4)} \cdot x$$

### ۶-۲- برنامه‌ریزی آرمانی فازی<sup>۵</sup>

در روش‌های حل مسائل بهینه‌سازی چند هدفه، برنامه‌ریزی آرمانی فازی (FGP) یک روش توسعه داده شده از روش برنامه‌ریزی آرمانی ۶ (GP) است. در این روش برای هر هدف با استفاده از تابع عضویت فازی یک آرمان تعریف می‌شود که مقدار هر آرمان در بازه ۰ تا ۱ است که برای هر هدف بهترین حالت آرمانی مقدار ۱ است. سپس یک تابع هدف جدید از مجموع وزنی آرمان‌های تعریف شده برای اهداف مساله باز نویسی می‌شود.

$$\min \sum_{i=1}^n w_i \times \mu_i \quad (۴۲)$$

$$s. t.$$

$$H_k(X) = (\leq \text{ or } \geq \text{ or } 0) \quad k = 1, 2, \dots, m \quad (۴۳)$$

فازی دوزنقه‌ای<sup>۱</sup> (TFN) نامیده می‌شود شکل (۲). اگر در یک مساله بهینه‌سازی، برخی از پارامترها به صورت یک عدد فازی دوزنقه‌ای باشند آن‌گاه می‌توان از رویکردهای مختلفی از جمله رویکرد برنامه‌ریزی امکانی<sup>۲</sup> برای حل این مساله بهینه‌سازی استفاده کرد. فرم کلی برنامه‌ریزی امکانی به صورت زیر است:

$$\min Z = E(\tilde{c}x) \quad (۲۶)$$

$$s. t.$$

$$Me(Ax \geq \tilde{F}) \geq p \quad (۲۷)$$

$$x \in X \quad (۲۸)$$

روابط ۲۶-۲۸ توسعه یافته برنامه‌ریزی امکانی کلاسیک است. از  $Me(\cdot)$  به جای اندازه امکان حالت کلاسیک استفاده می‌شود و مقدار  $p$  از داخل مدل بدست می‌آید.  $Me(\cdot)$  حالت کلی یک اندازه فازی است.  $\tilde{c}$  و  $\tilde{F}$  داده‌های فازی مسئله فازی دوزنقه‌ای هستند [۵۰، ۶].

$$\tilde{F} = (f_{(1)}, f_{(2)}, f_{(3)}, f_{(4)}) \quad (۲۹)$$

$$\tilde{c} = (c_{(1)}, c_{(2)}, c_{(3)}, c_{(4)})$$

برای کنترل قیود فازی یکی از اندازه‌های فازی پرکاربرد، اندازه اعتبار  $Cr^3$  است که به صورت میانگین دو اندازه خوش‌بینانه  $Pos$  و بدبینانه  $Nec$  تعریف می‌شود:

$$Cr(\cdot) = \frac{1}{2} (Pos(\cdot) + Nec(\cdot)) \quad (۳۰)$$

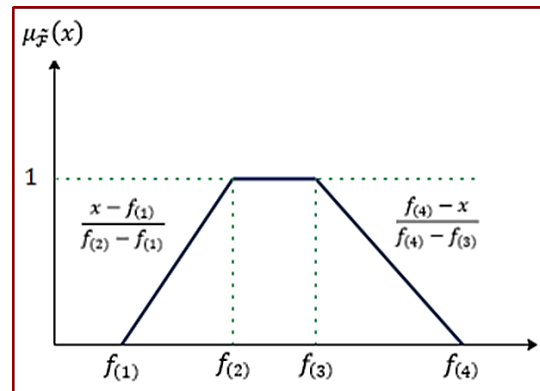
براین اساس روابط ۳۱-۳۲ برقرار است:

$$Cr(Ax \geq \tilde{F}) \geq p \Leftrightarrow Ax \geq f_{(3)} + (2p - 1)(f_{(4)} - f_{(3)}) \quad (۳۱)$$

$$p \geq 0.5$$

$$Cr(Ax \leq \tilde{F}) \geq p \Leftrightarrow Ax \leq f_{(2)} - (2p - 1)(f_{(2)} - f_{(1)}) \quad (۳۲)$$

$$p \geq 0.5$$



شکل (۲). تابع عضویت عدد فازی دوزنقه‌ای

<sup>۴</sup> Robust Fuzzy Programming

<sup>۵</sup> Fuzzy Goal Programming

<sup>۶</sup> Goal Programming

<sup>۱</sup> Trapezoidal Fuzzy Number (TFN)

<sup>۲</sup> Possibilistic Programming

<sup>۳</sup> Credibility

جدول (۱). مقایسه نتایج مدل

مقدار هدف		تابع هدف
برنامه ریزی غیر قطعی تصادفی فازی آرمانی در حالت بهینه سازی استوار	برنامه ریزی غیر قطعی فازی آرمانی	
۲۲۰۷۰۵	۲۶۲۶۳۹	۱
۱۹	۲۴	۲

مقدار تابع هدف هزینه کل زنجیره تامین در حالت غیر قطعی فازی آرمانی ۲۶۲۶۳۹ واحد و در حالت غیر قطعی تصادفی فازی آرمانی بر اساس سناریو ۲۲۰۷۰۵ واحد می‌باشد. همچنین مقدار تابع هدف کمینه کردن تعداد محصولات که بدون تست و ارزیابی برای مشتری ارسال می‌شود در حالت غیر قطعی فازی آرمانی ۲۴ واحد و در حالت غیر قطعی تصادفی فازی آرمانی بر اساس سناریو ۱۹ واحد می‌باشد. لازم به ذکر است که در شرایط غیر قطعی فازی آرمانی یک سناریو انتخاب شده که متوسط تمام سناریوها در حالت غیر قطعی تصادفی فازی آرمانی می‌باشد. نتایج نشان می‌دهد که همواره مدل برنامه ریزی آرمانی تصادفی فازی سناریو محور بر اساس پارامترهای غیر قطعی تصادفی فازی در مدل طراحی شده برای این مساله مقادیر بهتری را نسبت به حالت غیر قطعی فازی نتیجه می‌دهد. پارامترهای غیرقطعی به صورت اعداد فازی دوزنقه‌ای در نظر گرفته شده است.

### ۷-۱- تحلیل پارامترهای مدل

با توجه به اهمیت پارامترهای غیرقطعی و تعدادی پارامترهای قطعی تمامی پارامترها به صورت گروهی مورد تحلیل و بررسی قرار گرفته است. پارامترهای غیرقطعی فازی و تصادفی فازی مدل در دو گروه مجزا، گروه ۱ شامل هزینه تامین ماژول، مقدار تقاضا و ظرفیت تامین ماژول و گروه ۲ شامل نرخ اطمینان، تعمیرپذیری و پارامترهای قطعی به جز پارامتر هزینه ثابت اخذ قرارداد با تامین کننده در دو گروه مجزا، گروه ۱ شامل هزینه احداث مرکز تعمیر، هزینه احداث مرکز ارزیابی و هزینه احداث مرکز باز تولید و گروه ۲ شامل هزینه تولید محصول، هزینه ارزیابی و کنترل کیفیت محصول، هزینه تعمیر و اصلاحات جزئی محصول و هزینه پردازش محصولات ناسالم تقسیم بندی شد. با توجه، به تعدد پارامترهای قطعی و غیرقطعی، نمایش و تحلیل همگی آن‌ها امکان پذیر نمی‌باشد. قسمتی از نتایج در این مقاله ارائه می‌شود.

علاوه بر این گروه‌ها، درصد تغییرات پارامتر درصد ظرفیت مختل شده تامین کننده ماژول و درصد تغییرات پارامتر وزنی امکان استواری مورد تحلیل و بررسی قرار گرفته است.

$$F_i(X) - d_i^+ + d_i^- = b_i \quad i = 1, 2, \dots, n \quad (44)$$

$$\mu_i = \frac{d_i^- - Z_{d_i^+}}{Z_{d_i^+} - Z_{d_i^-}} \quad i = 1, 2, \dots, n \quad (45)$$

$$\sum_i w_i = 1 \quad i = 1, 2, \dots, n \quad (46)$$

$$d_i^+, d_i^- \geq 0 \quad i = 1, 2, \dots, n \quad (47)$$

در آرمان‌های نوع سود  $d_i^-$  انحراف‌های منفی و در آرمان‌های نوع هزینه  $d_i^+$  انحراف‌های مثبت از مقدار سطح انتظار یا آرمان هدف نام می‌باشند که باید به حداقل برسد.  $H_k(X)$  محدودیت  $k$ ام و  $F_i(X)$  هدف نام می‌باشند.  $\mu_i$  درجه برآورد هدف نام،  $Z_{d_i^+}$  کران بالای  $d_i^+$  و  $Z_{d_i^-}$  کران پایین  $d_i^-$  است [۵۴].

### ۷- تحلیل نتایج مدل

در این بخش، برای سنجش اعتبار، ارزیابی و صحت کارآمدی و کاربردی مدل، نتایج اجرای‌های مدل طراحی شده در ابعاد مطالعه موردی ارائه شده است. داده‌های مدل تصادفی فازی هستند. برای حل مدل در نهایت مدل با روش بهینه‌سازی برنامه‌ریزی تصادفی فازی آرمانی حل شده است. کد مدل طراحی شده با رویکرد دقیق در نرم افزار GAMS نسخه ۲۵،۱،۲ با لپ تاپ ۵ هسته‌ای با سرعت پردازنده ۴،۲۷ گیگا هرتز با حل کننده CPLEX پیاده‌سازی و اجرا شده است.

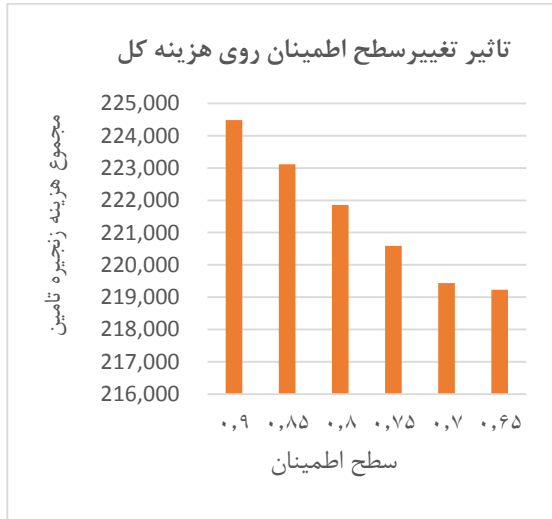
بررسی نتایج بر اساس داده‌های واقعی جمع‌آوری شده از یک تولیدکننده پمپ‌های کرایوژنیک در صنایع نفتی انجام شده است. زنجیره تامین پایا پاسخگوی تقاضا از ۲۰ منطقه مشتری است. در این مطالعه ۵ مرکز تامین ماژول که مجموعاً توانایی تامین ۱۰ عدد ماژول مورد نیاز جهت تولید ۳ نوع محصول نهایی در ۵ مرکز تولید موجود و فعال را دارند در نظر گرفته شده است. با توجه به اهمیت موضوع تست، ارزیابی و تحویل محصول مرغوب به مشتریان ۱۵ مرکز ارزیابی، ۱۵ مرکز تعمیر و ۵ مرکز بازتولید در ۳ سطح کوچک، متوسط و بزرگ مکان‌یابی شده است. در نهایت با در نظر گرفتن ماهیت تولید این محصول، نتایج مدل در ۵ سناریو مورد بررسی قرار گرفته است که در این مقاله، نتایج یکی سناریوها ارائه می‌شود.

به منظور بررسی مطلوبیت مدل پیشنهادی، نتایج مدل در حالت غیر قطعی فازی آرمانی ۱ که مقادیر پارامترها از میانگین اعداد فازی به دست آمده و به کار گرفتن رویکرد استوار امکانی، با مدل غیر قطعی تصادفی فازی آرمانی ۲ مقایسه شده است.

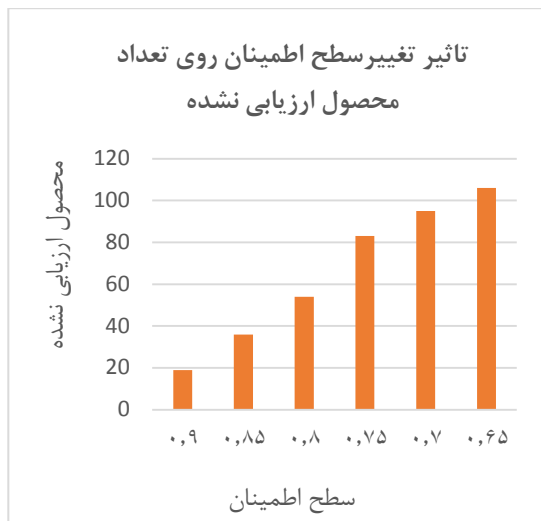
<sup>1</sup> Nominal Fuzzy Goal Programming

<sup>2</sup> Stochastic Fuzzy Goal Programming

با توجه به شکل (۵)، با افزایش میزان اختلالات میزان ارسال محصولات ارزیابی نشده افزایش خواهد داشت و پایایی، تضمین کیفیت و سالم بودن محصولات عرضه شده از مراکز ارزیابی به مشتریان کاهش یافته است.

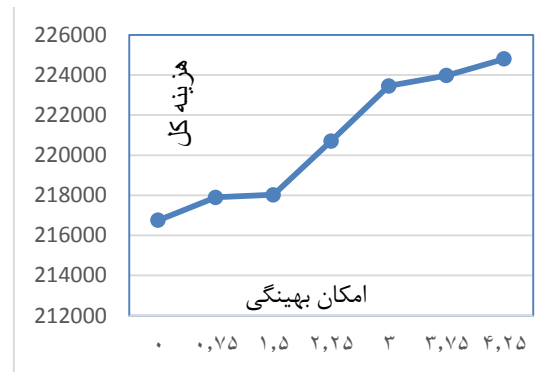


شکل (۶). تأثیر تغییرات سطح اطمینان بر هزینه کل زنجیره تامین



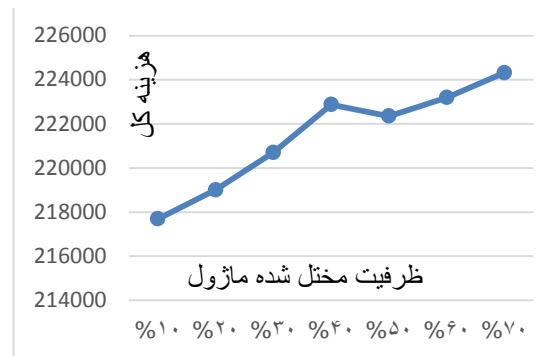
شکل (۷). تأثیر تغییرات سطح اطمینان بر تعداد محصول ارزیابی نشده

مطابق شکل (۶)، کمترین هزینه زنجیره تامین در سطح اطمینان ۰/۶۵ می باشد. شاید این سطح اطمینان با توجه به کمترین هزینه گزینه مناسبی برای مدل پیشنهادی به نظر می رسد ولی از آنجائی که نتیجه مطلوب، کاهش هم زمان هر دو تابع هدف می باشد، انتخاب این سطح اطمینان به دلیل دارا بودن بیشترین تعداد محصول ارزیابی نشده ارسال شده برای مشتری انتخاب بهینه نیست. در شکل (۷)، تأثیر تغییر سطح اطمینان روی تعداد محصول ارزیابی نشده، نشان داده شده است که با کاهش سطح اطمینان، تعداد محصول ارزیابی نشده بیشتر می شود که نشانگر عملکرد مطلوب مدل می باشد.

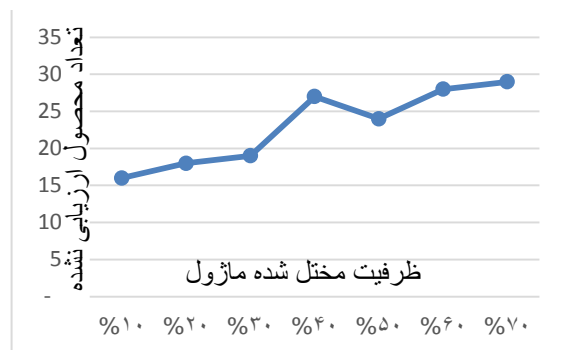


شکل (۳). تأثیر تغییرات میزان امکان بهینگی بر هزینه کل زنجیره تامین

مطابق شکل (۳)، با در نظر گرفتن مقدار مناسب برای ضریب  $\eta$  امکان بهینگی، استواری بهینگی جوابها بر مبنای ارجحیتها و میزان ریسک پذیری تصمیم گیرنده قابل کنترل خواهد بود.



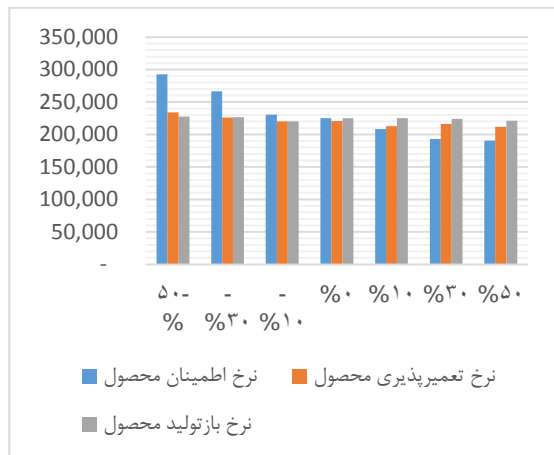
شکل (۴). تأثیر تغییرات درصد ظرفیت مختل شده تامین کننده ماژول بر هزینه کل زنجیره تامین



شکل (۵). تأثیر تغییرات درصد ظرفیت مختل شده تامین کننده ماژول بر تعداد محصول ارزیابی نشده

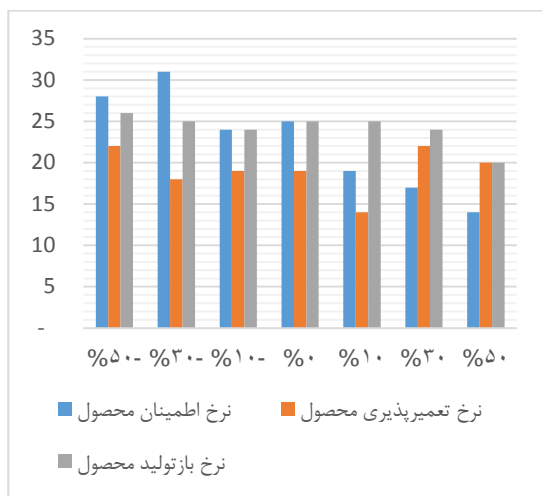
مطابق شکل (۴)، کمترین هزینه زنجیره تامین در سطح اختلال ۰,۱۰ می باشد. هرچه پایایی در زنجیره بیشتر، میزان اختلالات کمتر خواهد بود و تسهیلات با ظرفیت بیشتری خدمات ارائه می دهند. با کاهش پایایی و افزایش میزان اختلالات در ظرفیت تسهیلات، بازگشایی تسهیلات جدید افزایش خواهد یافت و به طور مستقیم در افزایش هزینه کل اثرگذار است.



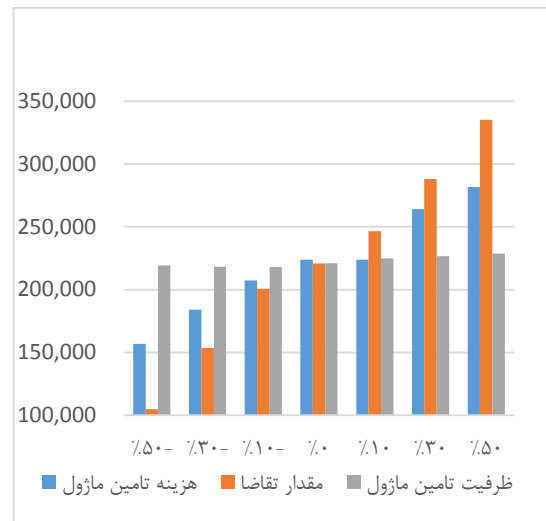


شکل (۱۰). تاثیر تغییرات پارامترهای غیر قطعی گروه ۲ بر هزینه کل زنجیره تأمین

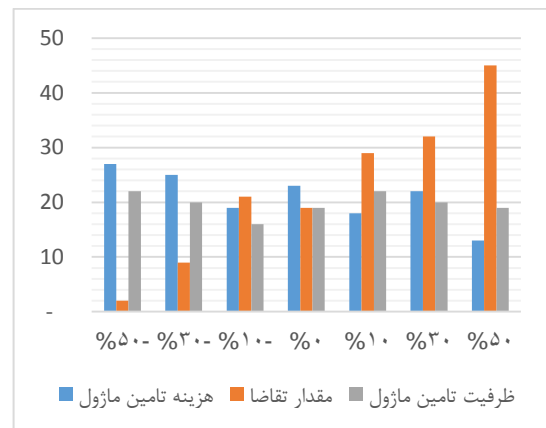
بر اساس شکل (۱۰)، با کاهش نرخ اطمینان محصول تولید شده، هزینه‌های زنجیره تأمین به شدت افزایش می‌یابد. با افزایش نرخ اطمینان هزینه‌های کل زنجیره تأمین افزایش قابل توجهی داشته است. با کاهش یا افزایش پارامترهای نرخ تعمیر پذیری و نرخ باز تولید تغییر خاصی در هزینه کل مشاهده نمی‌شود. لذا، مدل نسبت به این پارامترها حساسیتی ندارد. بر اساس شکل ۱۱، با کاهش نرخ اطمینان تولید، تعداد محصول ارزیابی نشده ارسالی برای مشتری افزایش و با افزایش نرخ اطمینان تولید، تعداد محصول ارزیابی نشده ارسالی برای مشتری کاهش یافته است. مدل نسبت به تغییرات نرخ باز تولید محصول حساسیت کمی نشان داده است و مقادیر هدف تغییر قابل توجهی ندارد. تغییرات نرخ تعمیر پذیری محصول نتایج منظمی در تعداد محصولات ارزیابی نشده ارسالی برای مشتری ایجاد نمی‌کند که لازم است دلایل این موضوع به تفصیل مورد ارزیابی قرار گیرد.



شکل (۱۱). تاثیر تغییرات پارامترهای غیر قطعی گروه ۲ بر تعداد محصول ارزیابی نشده



شکل (۸). تاثیر تغییرات پارامترهای غیر قطعی گروه ۱ بر هزینه کل زنجیره تأمین



شکل (۹). تاثیر تغییرات پارامترهای غیر قطعی گروه ۱ بر تعداد محصول ارزیابی نشده

درصد تغییرات مقادیر پارامترها در بازه  $[-50\%/+50\%]$  در نظر گرفته شده و مقادیر توابع هدف بر اساس این تغییرات محاسبه شده است. مطابق شکل (۸)، با توجه به بازه تغییرات مقادیر پارامترها، هزینه زنجیره تأمین نیز با یک نرخ منطقی تغییر کرده است.

با کاهش هزینه تأمین ماژول و مقدار تقاضا هزینه کل زنجیره تأمین نیز کاهش یافته و با افزایش این پارامترها افزایش هزینه کل زنجیره تأمین مشاهده می‌شود. با تغییرات مقدار تقاضا کاهش و افزایش هزینه بیشتری را مشاهده می‌شود. با کم شدن ظرفیت تأمین ماژول توسط مراکز تأمین، تغییرات هزینه تقریباً به صورت خطی است و تغییر خاصی ایجاد نمی‌شود. فقط در حالتی که این ظرفیت از حدود  $30\%$  تجاوز کند، هزینه‌ها کمی افزایش می‌یابد. بر اساس شکل (۹)، تغییرات تقاضا به طور نسبی، در مجموع، تغییرات افزایش تعداد محصول ارزیابی نشده را نشان می‌دهد.

تغییرات پارامتر هزینه متغیر خرید و ارسال ماژول‌ها، نتایج کاملاً متفاوت در تعداد محصول ارزیابی نشده نسبت به حالت قبل دارد. دلیل این تغییرات به عوامل متعدد وابسته بوده و باید به طور گسترده مورد مطالعه و ارزیابی قرار گیرد.

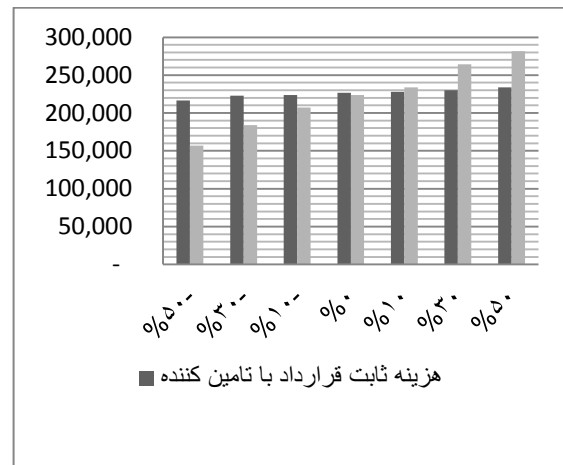
آگاهی مدیران زنجیره تامین نسبت به تاثیر هزینه‌هایی که در هر زنجیره وجود دارد، لازم و ضروری است.

گروه ۱ پارامترهای قطعی شامل هزینه احداث مرکز تعمیر، هزینه احداث مرکز ارزیابی و هزینه احداث مرکز باز تولید است. در این مورد مطالعاتی، احداث مراکز تعمیر، ارزیابی و بازتولید ضروری بوده و با توجه به هزینه‌های هر بخش تاثیرات آن‌ها با کاهش هزینه‌ها در بازه ۵۰٪ تا ۴۰٪- متوسط بیشترین کاهش هزینه در تابع هدف اول مربوط به پارامتر احداث مرکز باز تولید می‌باشد. با تغییر این پارامترها در بازه ۴۰٪- تا ۵۰٪، متوسط تغییرات ناشی از هر ۳ پارامتر به صورت یکسان بوده است. تعمیر و تغییر در هزینه احداث مرکز ارزیابی باعث افزایش مقدار هزینه‌های زنجیره در همین محدوده می‌باشد.

تغییرات کاهش و یا افزایشی این پارامترها سبب بروز تغییرات گسترده در تعداد محصول ارزیابی نشده ارسال برای مشتری می‌گردد. با توجه به هزینه بالای این محصول و اهمیت فوق العاده حیاتی جهت کارکرد بدون نقص در زمان بهره برداری، چنانچه حتی یک واحد محصول ارزیابی نشده بیشتر برای مشتری ارسال شده و همان محصول عملکرد مطلوبی نداشته باشد، سبب بروز خسارت‌های جبران ناپذیری می‌گردد، لذا برای مدیریت حفظ حالت بهینه در مقدار این تابع هدف از اهمیت بالایی برخوردار است. با کاهش پارامترهای مذکور به میزان ۳۰٪ نسبت به فرضیات مدل مقادیر هر دو تابع هدف به مقدار حداقل نزدیک‌تر و و بهینه‌تر می‌شود. واضح است که ارائه نظر قطعی در این موضوع به دقت نظر و بررسی‌های دقیق‌تری نیاز دارد و در عمل کاهش هم‌زمان هزینه‌های احداث هر ۳ مرکز، غیرممکن می‌باشد.

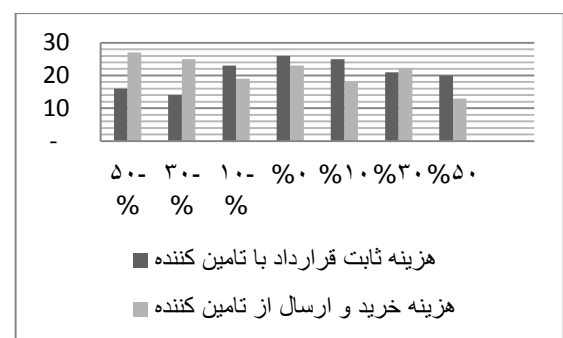
گروه ۲ پارامترهای قطعی مربوط به هزینه‌های تولید، ارزیابی، پردازش و تعمیرات محصول می‌باشد که بر طبق نتایج، تغییرات هزینه پردازش محصول ناسالم، تعمیر جزئی محصول و ارزیابی محصول تاثیر قابل توجهی در مقدار تابع هزینه‌های زنجیره ندارند. کاهش و یا افزایش هزینه تولید محصول به شدت مقدار تابع هدف را تحت تاثیر قرار داده است. با کاهش هزینه‌های تولید، هزینه کل زنجیره تامین کاهش یافت. کنترل هزینه‌های تولید در تصمیم‌گیری مدیریت از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است. همچنین با تغییر دامنه پارامترها، پراکندگی زیادی در نتایج تابع هدف مشاهده می‌شود که بدلیل نیاز به بررسی‌های گسترده جهت کشف دلایل این موضوع، مطالعه بیشتر به زمان دیگری موکول می‌شود.

با توجه به این که، در این تحقیق یک محصول ماژولار مورد مطالعه قرار گرفته، بهتر است تا تاثیر ۲ پارامتر هزینه ثابت اخذ قرار داد با تامین کننده ماژول و همچنین هزینه واحد تدارکات برای خرید و ارسال ماژول از تامین کنندگان به مراکز تولید نیز مورد بررسی قرار گیرد که نتایج آن در شکل (۱۲) و (۱۳) قابل مشاهده می‌باشد.



شکل (۱۲). تاثیر تغییرات پارامترهای مرتبط با تامین ماژول بر هزینه کل زنجیره تامین

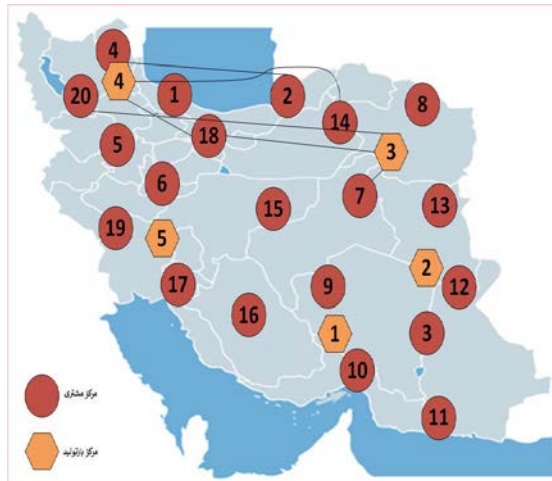
با توجه به پایین بودن هزینه ثابت قرارداد با تامین کننده ماژول‌ها، تغییر این پارامتر تاثیر قابل توجهی در نتایج مدل و کاهش هزینه کل ندارد. اما، تغییر هزینه خرید و ارسال ماژول تاثیر مستقیم و قابل توجه در هزینه کل زنجیره تامین دارد. که در نتیجه، لازم است تا مدیریت دقت نظر خاصی به این پارامتر داشته باشد و در جهت کاهش این هزینه که منجر به بهینه شدن نتایج می‌گردد، تلاش خود را معطوف نماید.



شکل (۱۳). تاثیر تغییرات پارامترهای مرتبط با تامین ماژول بر تعداد محصول ارزیابی نشده

کاهش بیش از حد هزینه ثابت اخذ قرارداد با تامین کننده ماژول سبب کاهش در تعداد محصول ارزیابی نشده و افزایش بیش از حد این پارامتر باعث بیشتر شدن تعداد محصولات ارزیابی نشده می‌شود.

لازم است که در مرکز تعمیر، ارزیابی محصول نیز انجام شده و محصول ارسالی برای مشتری از کیفیت مطلوب با در نظر گرفتن سطح اطمینان فرض شده در مدل برخوردار است لذا محصولی که از مرکز تعمیر و یا ارزیابی برای مشتری ارسال می‌گردد از نظر کیفیت تفاوتی با هم ندارند. محصولی که بعد از ارزیابی قابلیت ارسال برای مشتری ندارد به مرکز تعمیر ارسال می‌گردد. محصولی که در مرکز تعمیر مورد پردازش و ارزیابی قرار گرفته است و قابلیت ارسال برای مشتری نداشته باشد به مرکز بازتولید ارسال می‌گردد. مطابق شکل ۱۶، در سناریوی مورد بررسی فقط مراکز بازتولید ۳ و ۴ مکان‌یابی و انتخاب شده‌اند. تعدادی از محصولات که قابلیت اصلاح داشته باشند، در مرکز بازتولید مورد تعمیر و ارزیابی قرار گرفته است و برای مناطق مشتری ارسال می‌گردد.



شکل (۱۶). جریان ماژول از مرکز تامین به مرکز تولید

#### ۸- نتیجه‌گیری

در این تحقیق، یک زنجیره تأمین تولید و باز تولید محصولات ماژولار بر اساس یک مدل ریاضی تصادفی فازی امکانی احتمالی دو هدفه در ۶ سطح اصلی تأمین‌کنندگان ماژول‌ها، مراکز تولید اولیه، مراکز بازرسی، مراکز تعمیر، مراکز بازتولید و مشتریان بر اساس مطالعه موردی واقعی تولید پمپ‌های کرایونیک صادرات LPG از تجهیزات حیاتی در صادرات پروپان و بوتان مایع در ایران طراحی و ارائه شده است.

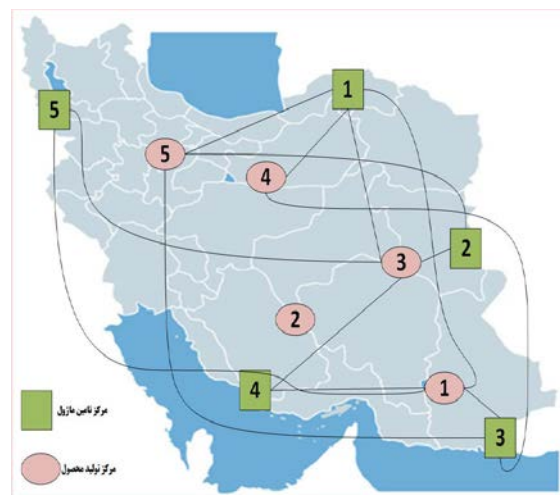
رویکردهای غیر قطعی در مدل‌سازی، تصادفی بر اساس سناریو و رویکرد فازی امکانی استوار است. روش بهینه‌سازی برنامه‌ریزی آرمانی تصادفی فازی برای حل مدل استفاده شده است. اعتبار سنجی، ارزیابی و صحت کارآمدی کاربردی مدل طراحی شده در ابعاد مطالعه موردی انجام و ارائه شده است. پارامترهای غیرقطعی، تعدادی از پارامترهای قطعی و مکان‌یابی و جریان بین تسهیلات مورد تحلیل و بررسی قرار گرفته است. بر

#### ۲-۷- تحلیل جریان بین تسهیلات و مکان‌یابی

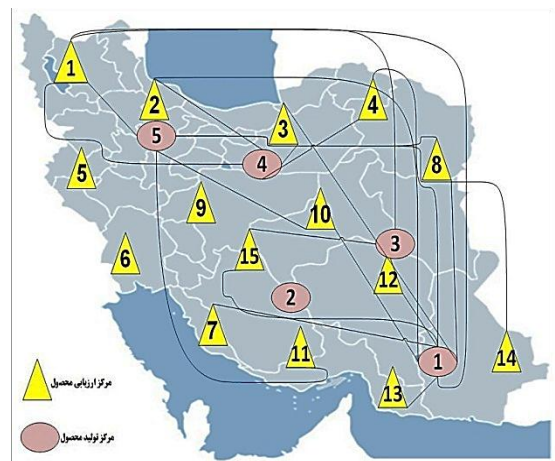
در تمام ارزیابی‌های صورت گرفته از جریان ماژول یا محصول بین تمامی تسهیلات، شرایط هر ۳ نوع محصول تولیدی در سناریو ۱ مورد بررسی قرار گرفته است. تحلیل نتایج مدل برای سناریوی مورد بررسی به شرح زیر است:

شکل (۱۴)، نشان می‌دهد که تمامی مراکز تأمین ماژول در سناریو ۱ مکان‌یابی و از آن‌ها به مقصد مراکز تولید قطعات ارسال شده است. مرکز تولید ۲ با توجه به سناریو در زنجیره انتخاب نشده است. از مرکز تأمین ماژول شماره ۱ به تمامی مراکز تولید فعال قطعه ارسال می‌گردد. مراکز تولید ۱ و ۳ نیز با همه مراکز تأمین ماژول ارتباط دارند.

مطابق شکل (۱۵)، نیز مراکز ارزیابی شماره‌های ۵ و ۶ مکان‌یابی نشده و محصولی جهت ارزیابی به آن‌ها ارسال نگردیده است. مرکز شماره ۱ فعال‌ترین مرکز ارزیابی می‌باشد و محصول تولیدی ۳ مرکز تولید به آن ارسال می‌گردد. از ۲ مرکز تولید شماره ۱ و ۵ محصول ارزیابی نشده برای ۳ مرکز مشتری ارسال می‌گردد.



شکل (۱۴). جریان ماژول از مرکز تامین به مرکز تولید



شکل (۱۵). جریان محصول از مرکز تولید به ارزیابی

- [7] R. C. Allen, S. Avraamidou, and E. N. Pistikopoulos, "Production Scheduling of Supply Chains Comprised of Modular Production Units," IFAC-PapersOnLine, vol. 53, no. 2, pp. 11452-11457, 2020.
- [8] A. Hamidieh, B. Naderi, M. Mohammadi, and M. Fazli-Khalaf, "A robust possibilistic programming model for a responsive closed loop supply chain network design," Cogent Mathematics, vol. 4, no. 1, p. 1329886, 2017.
- [9] E. B. Tirkolaee, A. Mardani, Z. Dashtian, M. Soltani, and G.-W. Weber, "A novel hybrid method using fuzzy decision making and multi-objective programming for sustainable-reliable supplier selection in two-echelon supply chain design," Journal of Cleaner Production, vol. 250, p. 119517, 2020.
- [10] R. Babazadeh, J. Razmi, and R. Ghodsi, "Supply chain network design problem for a new market opportunity in an agile manufacturing system," Journal of Industrial Engineering International, vol. 8, no. 1, pp. 1-8, 2012.
- [11] K. N. Rao, K. V. Subbaiah, and G. V. P. Singh, "Design of supply chain in fuzzy environment," Journal of Industrial Engineering International, vol. 9, no. 1, pp. 1-11, 2013.
- [12] Q. Cheng, S. Wang, and C. Yan, "Robust optimal design of chilled water systems in buildings with quantified uncertainty and reliability for minimized life-cycle cost," Energy and Buildings, vol. 126, pp. 159-169, 2016.
- [13] N. Gupta, S. Haseen, and A. Bari, "Reliability optimization problems with multiple constraints under fuzziness," Journal of Industrial Engineering International, vol. 12, no. 4, pp. 459-467, 2016.
- [14] M. Bevilacqua, F. Ciarapica, and G. Marcucci, "A modular analysis for the supply chain resilience triangle," IFAC-PapersOnLine, vol. 51, no. 11, pp. 1528-1535, 2018.
- [15] H. Akkermans and L. N. Van Wassenhove, "Supply chain tsunamis: research on low probability, high-impact disruptions," Journal of Supply Chain Management, vol. 54, no. 1, pp. 64-76, 2018.
- [16] W. W. Lowrance, "Of acceptable risk: Science and the determination of safety," 1976.
- [17] N. Ni, B. J. Howell, and T. C. Sharkey, "Modeling the impact of unmet demand in supply chain resiliency planning," Omega, vol. 81, pp. 1-16, 2018.
- [18] P. Peng, L. V. Snyder, A. Lim, and Z. Liu, "Reliable logistics networks design with facility disruptions," Transportation Research Part B: Methodological, vol. 45, no. 8, pp. 1190-1211, 2011.
- [19] Z. Drezner, "Heuristic solution methods for two location problems with unreliable facilities," Journal of the Operational Research Society, vol. 38, no. 6, pp. 509-514, 1987.
- اساس نتایج، در این مطالعه، تعدادی از محصولات در مراکز تعمیر و بازتولید به دلیل عدم تعمیر و باز تولید قابلیت اصلاح ندارد و به طور کلی از خط تولید خارج می‌شوند. تعداد محصولات برگشتی از سناریو مستقل است. در تمام سناریوهای ممکن عدد قابل ملاحظه‌ای محصول برگشتی مشاهده شده است که در افزایش هزینه‌ها نقش به‌سزایی را ایفا می‌کند. تعدادی ماژول نوع  $m$  به دلیل نقص در مرکز بازتولید قابل استفاده نیستند. بخشی از تعداد محصولات برگشتی به دلیل نقص در ماژول‌ها مورد تایید قرار نگرفته است ولی تفکیک مشخصی از این که سهم خرابی ماژول در عدم تایید نهایی محصول چند درصد می‌باشد در دسترس نیست. پیشنهادهای متعددی در ادامه‌ی این تحقیق قابل ارائه است، از جمله؛ حداقل‌سازی تعداد محصولات برگشتی بدون پایین آوردن سطح اطمینان محصول، بررسی درصد سهم خرابی و نقص ماژول در عدم تایید نهایی محصول و در نظر گرفتن موانع و هزینه‌های تامین ماژول‌ها در بررسی معیارهای کیفی انتخاب تامین‌کنندگان.
- ### ۹- مراجع
- [1] K. Sarrafha, S. H. A. Rahmati, S. T. A. Niaki, and A. Zaretalab, "A bi-objective integrated procurement, production, and distribution problem of a multi-echelon supply chain network design: A new tuned MOEA," Computers & Operations Research, vol. 54, pp. 35-51, 2015.
- [2] P. N. K. Phuc, F. Y. Vincent, and S.-Y. Chou, "Optimizing the fuzzy closed-loop supply chain for electrical and electronic products," in 2012 International conference on Fuzzy Theory and Its Applications (iFUZZY2012), 2012, pp. 316-321: IEEE.
- [3] B. Vahdani, R. Tavakkoli-Moghaddam, M. Modarres, and A. Baboli, "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, 2012.
- [4] H.-F. Wang and H.-W. Hsu, "A possibilistic approach to the modeling and resolution of uncertain closed-loop logistics," Fuzzy Optimization and Decision Making, vol. 11, no. 2, pp. 177-208, 2012.
- [5] Y. Zhang, A. Diabat, and Z.-H. Zhang, "Reliable closed-loop supply chain design problem under facility-type-dependent probabilistic disruptions," Transportation Research Part B: Methodological, vol. 146, pp. 180-209, 2021.
- [6] M. S. Pishvaei and S. A. Torabi, "A possibilistic programming approach for closed-loop supply chain network design under uncertainty," Fuzzy sets and systems, vol. 161, no. 20, pp. 2668-2683, 2010.

- [33] L. Benyoucef, X. Xie, and G. A. Tanonkou, "Supply chain network design with unreliable suppliers: a Lagrangian relaxation-based approach," *International Journal of Production Research*, vol. 51, no. 21, pp. 6435-6454, 2013.
- [34] X. Feng, I. Moon, and K. Ryu, "Revenue-sharing contracts in an N-stage supply chain with reliability considerations," *International Journal of Production Economics*, vol. 147, pp. 20-29, 2014.
- [35] S. H. R. Pasandideh, S. T. A. Niaki, and K. Asadi, "Optimizing a bi-objective multi-product multi-period three echelon supply chain network with warehouse reliability," *Expert Systems with Applications*, vol. 42, no. 5, pp. 2615-2623, 2015.
- [36] G. Li, L. Zhang, X. Guan, and J. Zheng, "Impact of decision sequence on reliability enhancement with supply disruption risks," *Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review*, vol. 90, pp. 25-38, 2016.
- [37] D. Rahmani and V. Mahoodian, "Strategic and operational supply chain network design to reduce carbon emission considering reliability and robustness," *Journal of Cleaner Production*, vol. 149, pp. 607-620, 2017.
- [38] C. Ha, H.-B. Jun, and C. Ok, "A mathematical definition and basic structures for supply chain reliability: A procurement capability perspective," *Computers & Industrial Engineering*, vol. 120, pp. 334-345, 2018.
- [39] M. Fazli-Khalaf, B. Naderi, M. Mohammadi, and M. S. Pishvaei, "Design of a sustainable and reliable hydrogen supply chain network under mixed uncertainties: A case study," *International Journal of Hydrogen Energy*, vol. 45, no. 59, pp. 34503-34531, 2020.
- [40] Y. Kristianto and P. Helo, "Reprint of "Product architecture modularity implications for operations economy of green supply chains",," *Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review*, vol. 74, pp. 63-80, 2015.
- [41] F. Rossi, F. Manenti, and G. Reklaitis, "A general modular framework for the integrated optimal management of an industrial gases supply-chain and its production systems," *Computers & Chemical Engineering*, vol. 82, pp. 84-104, 2015.
- [42] J. O. Aguila, W. ElMaraghy, and H. ElMaraghy, "Impact of risk attitudes on the concurrent design of supply chains and product architectures," *Procedia CIRP*, vol. 81, pp. 974-979, 2019.
- [43] P.-Y. Hsu, M. Aurisicchio, and P. Angeloudis, "Risk-averse supply chain for modular construction projects," *Automation in Construction*, vol. 106, p. 102898, 2019.
- [44] P.-Y. Hsu, M. Aurisicchio, and P. Angeloudis, "Optimal logistics planning for modular construction using multi-stage stochastic programming," *Transportation Research Procedia*, vol. 46, pp. 245-252, 2020.
- [20] L. V. Snyder and M. S. Daskin, "Reliability models for facility location: the expected failure cost case," *Transportation Science*, vol. 39, no. 3, pp. 400-416, 2005.
- [21] L. V. Snyder, M. P. Scaparra, M. S. Daskin, and R. L. Church, "Planning for disruptions in supply chain networks," in *Models, methods, and applications for innovative decision making: INFORMS*, 2006, pp. 234-257.
- [22] L. V. Snyder and M. S. Daskin, "Models for reliable supply chain network design," in *Critical infrastructure: Springer*, 2007, pp. 257-289.
- [23] C.-I. Hsu and H.-C. Li, "Reliability evaluation and adjustment of supply chain network design with demand fluctuations," *International Journal of Production Economics*, vol. 132, no. 1, pp. 131-145, 2011.
- [24] B. Vahdani, R. Tavakkoli-Moghaddam, F. Jolai, and A. Baboli, "Reliable design of a closed loop supply chain network under uncertainty: An interval fuzzy possibilistic chance-constrained model," *Engineering Optimization*, vol. 45, no. 6, pp. 745-765, 2013.
- [25] T. Cui, Y. Ouyang, and Z.-J. M. Shen, "Reliable facility location design under the risk of disruptions," *Operations research*, vol. 58, no. 4-part-1, pp. 998-1011, 2010.
- [26] Q. Li, B. Zeng, and A. Savachkin, "Reliable facility location design under disruptions," *Computers & Operations Research*, vol. 40, no. 4, pp. 901-909, 2013.
- [27] O. Berman, D. Krass, and M. B. Menezes, "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, 2013.
- [28] J. Razmi, A. Zahedi-Anaraki, and M. Zakerinia, "A bi-objective stochastic optimization model for reliable warehouse network redesign," *Mathematical and Computer Modelling*, vol. 58, no. 11-12, pp. 1804-1813, 2013.
- [29] X. Wang and Y. Ouyang, "A continuum approximation approach to competitive facility location design under facility disruption risks," *Transportation Research Part B: Methodological*, vol. 50, pp. 90-103, 2013.
- [30] Y. An, B. Zeng, Y. Zhang, and L. Zhao, "Reliable p-median facility location problem: two-stage robust models and algorithms," *Transportation Research Part B: Methodological*, vol. 64, pp. 54-72, 2014.
- [31] L. V. Snyder and M. S. Daskin, "Stochastic p-robust location problems," *Iie Transactions*, vol. 38, no. 11, pp. 971-985, 2006.
- [32] Z.-J. M. Shen, R. L. Zhan, and J. Zhang, "The reliable facility location problem: Formulations, heuristics, and approximation algorithms," *INFORMS Journal on Computing*, vol. 23, no. 3, pp. 470-482, 2011.

- [51] P. R. Burgess and F. T. Sunmola, "Prioritising Requirements of Informational Short Food Supply Chain Platforms Using A Fuzzy Approach," *Procedia Computer Science*, vol. 180, pp. 852-861, 2021.
- [52] A. De and S. P. Singh, "Analysis of fuzzy applications in the agri-supply chain: A literature review," *Journal of Cleaner Production*, p. 124577, 2020.
- [53] C. Lima, S. Relvas, and A. Barbosa-Póvoa, "Designing and planning the downstream oil supply chain under uncertainty using a fuzzy programming approach," *Computers & Chemical Engineering*, vol. 151, p. 107373, 2021.
- [54] A. K. Nasr, M. Tavana, B. Alavi, and H. Mina, "A novel fuzzy multi-objective circular supplier selection and order allocation model for sustainable closed-loop supply chains," *Journal of Cleaner Production*, vol. 287, p. 124994, 2021.
- [55] S. Nayeri, S. A. Torabi, M. Tavakoli, and Z. Sazvar, "A multi-objective fuzzy robust stochastic model for designing a sustainable-resilient-responsive supply chain network," *Journal of Cleaner Production*, p. 127691, 2021.
- [56] J. Shu, C.-P. Teo, and Z.-J. M. Shen, "Stochastic transportation-inventory network design problem," *Operations Research*, vol. 53, no. 1, pp. 48-60, 2005.
- [57] M. Bundschuh, D. Klabjan, and D. L. Thurston, "Modeling robust and reliable supply chains," *Optimization Online e-print*, 2003.
- [45] A. Bhosekar and M. Ierapetritou, "A framework for supply chain optimization for modular manufacturing with production feasibility analysis," *Computers & Chemical Engineering*, vol. 145, p. 107175, 2021.
- [46] S. D. Budiman and H. Rau, "A stochastic model for developing speculation-postponement strategies and modularization concepts in the global supply chain with demand uncertainty," *Computers & Industrial Engineering*, vol. 158, p. 107392, 2021.
- [47] M. Taleai, B. F. Moghaddam, M. S. Pishvaei, A. Bozorgi-Amiri, and S. Gholamnejad, "A robust fuzzy optimization model for carbon-efficient closed-loop supply chain network design problem: a numerical illustration in electronics industry," *Journal of cleaner production*, vol. 113, pp. 662-673, 2016.
- [48] H. Soleimani, K. Govindan, H. Saghafi, and H. Jafari, "Fuzzy multi-objective sustainable and green closed-loop supply chain network design," *Computers & industrial engineering*, vol. 109, pp. 191-203, 2017.
- [49] Y.-C. Tsao, V.-V. Thanh, J.-C. Lu, and V. Yu, "Designing sustainable supply chain networks under uncertain environments: Fuzzy multi-objective programming," *Journal of Cleaner Production*, vol. 174, pp. 1550-1565, 2018.
- [50] R. G. Yaghin, P. Sarlak, and A. Ghareaghaji, "Robust master planning of a socially responsible supply chain under fuzzy-stochastic uncertainty (A case study of clothing industry)," *Engineering Applications of Artificial Intelligence*, vol. 94, p. 103715, 2020.

---

**Design of a Reliable Supply Chain Network for Modular Products in Conditions of Uncertainty: A Case Study of LPG Export Cryogenic Pumps**

**A. Vahabi, A. Hamidieh\***

\*Assistant Professor, Department of Industrial Engineering, Technical and Engineering Faculty, Payam Noor University, Tehran, Iran

(Received: 01/12/2021; Accepted: 16/04/2022)

**Abstract**

*Nowadays, companies are trying to meet customer demand due to the economic characteristics of modern global business and complex supply chain operations. Global demand uncertainty is a major challenge that is exacerbated by the occurrence of disruptions. In this study, a multi-product fuzzy stochastic nonlinear mathematical programming model is proposed to design a reliable supply chain network considering a product with modular manufacturing technology at the risk of disruption. Also, a decision support system is designed for modular production, which plays a major role in increasing the reusability of products and reducing waste. The case study, focuses on the production of cryogenic pumps used for the export of LPG, which is a critical equipment in the export of liquid propane and butane. The structure of this supply chain network includes levels of module suppliers, primary production centers, inspection centers, repair centers, reproduction centers, and customers. To deal with the disturbances, a scenario-based stochastic approach has been used and parametric uncertainty has been managed with the possibilistic-robust hybrid programming approach. The model evaluation has been performed with a precise approach in GAMS software with CPLEX solver and the sensitivity analysis has addressed the uncertain parameters. The results show that the current approach while controlling the uncertainty, ensures the optimal flow of facilities.*

**Keywords:** Reliable Supply Chain, Modular Products, Uncertainty, Possibilistic-Robust Stochastic Programming

---

\* Corresponding Author E-mail: hamidieh@pnu.ac.ir